

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG**

Mechanisches Verhalten von HTR-Beton

Teil 5: Biaxiale Druckversuche

Abschlußbericht

Dr.-Ing.U.Diederichs

Dr.-Ing.C.Ehm

Juni 1986

**Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH,
Mannheim.**

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministers für Forschung
und Technologie**

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

H T R - Betonversuche

- Biaxiale Druckversuche -

Abschlußbericht

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

Dr.-Ing. C. Ehm

Juni 1986

Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim,
Bestellung Nr.: 649.513.0200.09550.30

Inhalt

1. Allgemeines und Aufgabenstellung
2. Experimentelles
 - 2.1 Randbedingungen und Umfang der Untersuchungen
 - 2.2 Beton
 - 2.3 Probekörper
 - 2.4 Versuchseinrichtung
 - 2.4.1 Prüfstand
 - 2.4.2 Lasteintragung, Instrumentierung
 - 2.4.3 Versuchsablauf
3. Versuchsergebnisse
 - 3.1 Bruchverhalten
 - 3.2 Bruchspannungen bei biaxialer Belastung
 - 3.3 Prüfeinflüsse auf die Probekörperdruckfestigkeit bei Raumtemperatur
 - 3.4 Spannungs-Dehnungs-Linien
4. Zusammenfassung, offene Probleme
5. Anhang (Tabellen, Bilder)

1. Allgemeines und Aufgabenstellung

Im Rahmen des HTR-Betonversuchshauptprogramms beauftragte die Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung von biaxialen Betondruckversuchen (Bestellung Nr. 649.513.0200.09550.30 vom 25.05.1984).

Das Ziel dieser Versuche war es, erste grundlegende Kenntnisse über das Festigkeits- und Verformungsverhalten der HTR-Betone unter biaxialen Belastungsverhältnissen und bei erhöhten Temperaturen zu gewinnen. Es sollten beide Betonsorten, und zwar der Basaltbeton und der Rheinkiesbeton, untersucht werden.

Die Untersuchungen waren insbesondere deshalb notwendig geworden, weil die zahlreichen bisher durchgeführten Untersuchungen zur mehraxialen Festigkeit von Beton nur bei Raumtemperatur erfolgten. Diese Ergebnisse sind jedoch im allgemeinen nicht auf höhere Temperaturen übertragbar /1, 2, 3/. Die Ergebnisse sind jedoch im Hinblick auf die wirtschaftliche Bemessung des Druckbehälters von Bedeutung, weil hier vorwiegend mehrachsige Spannungszustände vorherrschen.

Alle Versuche waren entsprechend der von der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH vorgegebenen technischen Spezifikation PNP-5131-CB-GHRA 000 914 vom 05.07.1984 durchzuführen. Der zu bearbeitende Versuchsumfang und die speziellen Randbedingungen sind aus Übersichtsgründen nochmals im nachfolgenden Kapitel detailliert zusammengestellt.

Nach Abschluß der ersten Phase der Untersuchungen wurden die bis dahin erzielten Versuchsergebnisse der Auftraggeberin in einem Zwischenbericht /4/ mitgeteilt. Im vorliegenden Abschlußbericht sind jedoch alle Versuchsergebnisse sowie wichtige Angaben über die Probekörperherstellung nochmals zusammengefaßt.

2. Experimentelles

2.1 Randbedingungen und Umfang der Untersuchungen

Die Randbedingungen für die Untersuchungen wurden in Anlehnung an die technischen Randbedingungen für die Auslegung des HTR-500-Spannbetonbehälters festgelegt (vgl. /5/ und /6/):

- Beanspruchungsverhältnisse: $\sigma_2 : \sigma_1 = 0,0; 0,2; 0,4; 0,66; 1,0$
- Temperaturen: 20 °C, 70 °C, 120 °C
- Beton: Rheinkiesbeton und Basaltbeton, jeweils B 55
- Lagerung der Probekörper: mindestens 90 Tage unter Wasser

Es wurden bei allen Randbedingungen die biaxiale Druckfestigkeit, die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen jedoch nur bei 70 °C bestimmt.

Das ergibt bei zweifacher Wiederholung 45 Versuche pro Beton.

2.2 Beton

Wie oben angeführt, wurden die Untersuchungen am Basalt- und am Rheinkiesbeton durchgeführt. Die genauen Betonzusammensetzungen enthält die Tabelle 1.

Die durchzuführenden Frischbetonprüfungen beschränkten sich auf die üblichen Messungen von Rohdichte, Ausbreitmaß und Luftporengehalt, die vor und nach Dosierung des Fließmittels vorgenommen wurden.

Der Gütenachweis erfolgte je Betoniertermin an neun Würfeln und an drei Zylindern (15/30). Die Zylinder wurden nach 90tägiger Wasserlagerung geprüft, während je drei Würfel nach 7-, 28- und 90tägiger Wasserlagerung abgedrückt wurden.

Detaillierte Angaben zu den einzelnen Betonagen sind in den Berichten /7/ und /8/ enthalten.

Für die Versuche mit Basaltbeton wurden Würfel (20 cm x 20 cm x 20 cm) am 14.12.1984 betoniert (Beton-Nr. 228/83), vgl. /7/.

Der Rheinkiesbeton wurde am 01.10.1984 betoniert (Beton-Nr. 152/84), vgl. /8/. Die Frisch- und Festbetoneigenschaften sind aus Übersichtsgründen nochmals in Tabelle 2 aufgeführt.

2.3 Probekörper

Für die Untersuchungen wurden scheibenförmige Probekörper ($\approx 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$) verwendet, wobei jeweils drei Proben aus einem Würfel ($20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) nach einem Betonalter $> 90 \text{ d}$ naß herausgesägt wurden (vgl. Bild 1). Die im Versuch mechanisch belasteten Stirnflächen wurden anschließend naß plangeschliffen. Danach wurden die Proben wieder bis unmittelbar vor der Versuchsdurchführung unter Wasser gelagert.

Der Materialabtrag beim Schleifen der Stirnflächen betrug in der Regel weniger als 2 mm in jeder Achse. Die dadurch bedingte Verringerung der Probekörperdimension $< 1 \%$ in den beiden beanspruchten Achsen) wurde bei der Auswertung der Bruchspannungen nicht berücksichtigt.

2.4 Versuchseinrichtung

Die ausführliche Beschreibung der Versuchseinrichtung (Konstruktion, Funktionsweise, Regelung und Messung) ist den Veröffentlichungen /1/ und /2/ zu entnehmen; daher wird an dieser Stelle nur noch auf die für die Durchführung der Versuche wesentlichen Details eingegangen.

2.4.1 Prüfstand

Zur Durchführung von mehraxialen Untersuchungen an Beton unter hohen Temperaturen ist es notwendig, über eine speziell konstruierte Prüfanlage und insbesondere über die entsprechenden meßtechnischen Einrichtungen zu verfügen. Diese Anforderungen werden durch die biaxiale Hochtemperatur-Prüfmaschine des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig erfüllt.

Einen Überblick über den Prüfstand gibt Abbildung 2. Der Belastungsrahmen besteht aus einer einteiligen, geschlossenen, senkrecht stehenden Stahlkonstruktion. Durch die Verwendung von zwei nebeneinander angeordneten, großzügig dimensionierten Stahlprofilen in geschlossener Bauweise konnte die Steifigkeit des Belastungsrahmens so festgelegt werden, daß sie die Steifigkeit des Hydrauliksystems übertrifft. Diese große Steifigkeit ist vor allem bei weggeregelten Versuchen notwendig. Gleichzeitig fielen die Abmessungen kleiner aus als bei Verwendung eines Rahmens aus Spannbeton.

Zusammen mit der senkrechten Aufstellung ergibt sich eine sehr gute Zugänglichkeit zu dem eigentlichen Prüfraum und dadurch ein problemloses Einrichten der Probekörper und der Meßsysteme. Auch konnte die Installation der Heizvorrichtung allein nach thermischen Gesichtspunkten vorgenommen werden, so daß eine gleichmäßige Temperaturverteilung im gesamten Probekörper erreicht werden konnte.

Dadurch, daß der Rahmen einteilig ausgelegt ist, wirken Eigenverformungen aus Symmetriegründen immer gleichmäßig. Das Problem der Raumstabilität des Probekörpermittelpunktes wird dabei regelungstechnisch gelöst.

Die Belastung der Probekörper erfolgt durch vier kraft- und wegregelbare Hydraulikzylinder mit maximal jeweils 1000 kN Kraft. Die Kräfte werden über wassergekühlte Druckstempel auf die Probekörper übertragen. Davon tragen drei Druckstempel jeweils eine, als Kugelkalotte ausgebildete sphärische Lagerung der Lasteintragungskonstruktionen, um trotz geringfügiger Abweichungen in Parallelität und Rechtwinkligkeit die Probekörper vollflächig zu belasten.

2.4.2 Lasteintragung, Instrumentierung

Die Lasteintragungskonstruktion hat wesentlichen Einfluß auf die Versuchsergebnisse, insbesondere die Festigkeitswerte. Sie soll dafür sorgen, daß die Last möglichst zwängungsfrei und definiert in den Probekörper eingetragen wird, um dort einen ebenso definierten und gleichmäßigen Spannungszustand zu erhalten.

Die Zwängung ergibt sich dabei aus der Querdehnungsbehinderung des Betons infolge Reibung durch die Lasteintragungskonstruktion. Die Zwängungen bauen einen mehraxialen Spannungszustand auf, der eine Festigkeitssteigerung des Betons bewirkt. Ebenfalls führt diese durch Reibung kraftschlüssige Verbindung zu einer Lastabwanderung in die seitlichen Lasteintragungen und damit zu einer Überschätzung der Festigkeit des Betons.

Zur Verringerung der Querdehnungsbehinderung sind verschiedene Lasteintragungskonstruktionen bekannt geworden (s. /9/ und /10/):

- hydraulische oder pneumatische Druckkissen, die allerdings für den Einsatz bei erhöhten und hohen Temperaturen nicht brauchbar sind.
- Starre Belastungsplatten mit verringerter Reibung durch Folienzwischenlagen und Schmierschichten. Auch hier ist der Einsatz bei höheren Temperaturen problematisch. Zudem ist die Gleitwirkung solcher Zwischenschichten stark von der Belastung abhängig.
- Auflösung der Belastungsplatte in einzelne Stäbchen, die durch Biegungen den Querverformungen des Probekörpers folgen können (Belastungsbürste nach Hilsdorf /10/).

Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß die Belastungsbürste die in eine Lasteintragungskonstruktion gestellten Anforderungen - auch im Hinblick auf die Hochtemperaturprüfung - am besten erfüllt.

Die bei diesen Untersuchungen verwandte Lasteintragungskonstruktion ist auf Abb. 3 dargestellt.

Belastungsreglung: An die Regeleinrichtungen von Anlagen zur Durchführung von Versuchen unter zweiaxialen Bedingungen und hohen Temperaturen sind spezielle Anforderungen gestellt /1/, /2/.

Diese speziellen Anforderungen wurden berücksichtigt, indem eine servohydraulische 4fach-Kraft-Weg-Regelung entwickelt wurde. Die Regeleinrichtungen sind dabei so ausgelegt, daß jeder der vier Belastungszylinder eine eigene Regelung für einen eigenen Hydraulikkreislauf mit Servoventil erhält. Die Regelungen erhalten ihre Ist-Werte von dem am jeweiligen Zylinder aufgebauten Wegaufnehmer bzw. von der im jeweiligen Zylinder eingebauten Kraftmeßdose. Dadurch ist eine separate Regelung eines jeden Zylinders möglich, d. h. er kann kraft- oder weggeregelt werden, kann eine vorgewählte Belastungsgeschwindigkeit fahren und einem vorgewählten Belastungspfad folgen.

Die achsenweise Kopplung der einzelnen Regelungen erlaubt den Versuchsablauf unter biaxialen Belastungsverhältnissen. Die beiden gegenüberliegenden Zylinder laufen dann synchron gegenläufig (closed-loop-Regelung), d. h. bei einem Anstieg der Belastung, kraft- oder weggeregelt, über-

nimmt in jeder Achse eine Regelung die Führung, der zweite Regelkreis arbeitet dann als Seitenregler. Eine Wegüberwachungsvorwahl begrenzt bei Bruch der Probekörper den Hub der Prüfzylinder, so daß eine Zerstörung der Belastungseinrichtungen ausgeschlossen ist.

Durch Konstanthalten der Wege aller vier Zylinder während der Aufheizung können Zwängungsuntersuchungen durchgeführt werden: durch Konstanthalten der Kräfte in je einer Achse können Relaxations- und Kriechversuche durchgeführt werden.

Meßsysteme: Bei den Untersuchungen zur Ermittlung des biaxialen Hochtemperaturverhaltens von Beton müssen während der Versuche die in die Probekörper eingebrachten Kräfte, deren Verformungen und Temperaturen gemessen werden. Eine Übersicht über die zu messenden Größen zeigt Abb. 4. Dazu dienen die im folgenden beschriebenen Meßsysteme.

Belastungsmessung: Zur Messung der in die Probekörper eingebrachten Kräfte stehen vier, jeweils zwischen Zylinder und Probekörper eingeschaltete Kraftmeßdosen zur Verfügung. Die Anbringung von zwei Kraftmeßdosen pro Achse bietet die Möglichkeit, den Einbau und Zustand der Probekörper zu überwachen, denn nur ein genau mittig eingebauter, planparalleler und rechtwinkliger Probekörper führt dazu, daß beide Kraftanzeigen einer Achse den notwendigerweise gleichen Wert anzeigen. Außerdem ist es so möglich, während eines Versuchs Abweichungen der Anzeigen voneinander festzustellen und so auf Fehler oder aber auch auf Kräfteumlagerungen im Probekörper zu schließen. Da sich die Kraftmeßdosen im gekühlten Bereich der Druckstempel befinden, können Fehler durch Temperatureinflüsse nicht auftreten.

Durch diese direkte Kräftemessung entfallen die Fehlermöglichkeiten, die sich durch indirekte Methoden, wie Messung mit Öldruckaufnehmern, ergeben können. Es sind hier keine Kalibrierversuche notwendig, und das zeitlich konstante Einhalten der Genauigkeit der Meßwerte kann überwacht werden.

Verformungsmessungen: Die Verformungen der Probekörper können auf verschiedenen Wegen festgestellt werden:

- durch Dehnungsmeßstreifen,
- durch Messung der Kolbenwege,
- durch direkte Verformungsmessung am Probekörper.

Der Einsatz von Dehnungsmeßstreifen kann nur bei Raumtemperatur angewendet werden.

Deshalb wurde zusätzlich ein Wegmeßsystem zur direkten Messung der Verformungen des Probekörpers installiert. Dabei mußten wegen der auftretenden hohen Temperaturen einige Besonderheiten beachtet werden. Da der eigentliche Wegaufnehmerkörper außerhalb des Hochtemperaturbereichs angebracht werden muß, müssen die Verformungswege aus dem heißen Bereich durch Wegübertrager übertragen werden. Abb. 5 zeigt das an einem Probekörper aufgebaute Dehnungsmeßsystem für Dehnungen in den belasteten Achsen.

Die Wegübertrager - aus Stahl für Raumtemperatur, aus Quarzglas für höhere Temperaturen - bestehen jeweils aus einem Rohr und einer darin verlaufenden Stange. Sie stützen sich in punktgelagerten Klötzchen ab, die auf dem Probekörper durch Klemmen zuverlässig fixiert sind, und enden auf Parallelstangen, an die angebaut induktive Wegaufnehmer die Differenzwege messen. Durch die veränderbare Anbringung der Klötzchen auf dem Probekörper werden Endflächeneffekte ausgeschaltet, die bei Messungen direkt zwischen den Stempeln zu Verfälschungen der Ergebnisse führen.

Heizsystem und Temperaturmessung: Die Beheizung der Probekörper erfolgt elektrisch mit einem in zwei gleiche Hälften geteilten Kammerofen. Die beiden hängend angeordneten Ofenhälften sind verfahrbar und werden zum Probe- und Meßsystemeinbau auseinandergefahren und zur Durchführung der Versuche geschlossen. Der Ofenraum umfaßt dann den Probekörper, die Belastungsbürsten und einen kleinen Teil der Belastungsstempel.

Drei thermisch durch Konvektionsbleche entkoppelte, einzeln regelbare Heizzonen sorgen für eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofenraum und beheizen die Probekörper indirekt über die beiden freien, flächenmäßig größten Oberflächen.

Zur Vermeidung von Temperaturgradienten in den Probekörpern durch den Einfluß der Belastungseinrichtungen wurde deshalb die Aufheizgeschwindigkeit

verringert. Zusätzlich wurde die Wärmeableitung durch die Belastungsstempel erheblich reduziert. Dies wurde erreicht durch Zwischenlagen von druck- und temperaturfesten Materialien zwischen Belastungsbürsten und Belastungsstempeln.

Eine 3-Zonen-PID-Programmregelung übernimmt das geregelte Aufheizen des Ofens und die Realisierung definierter Temperaturverläufe. Die Temperaturverläufe während der Aufheizung und der Haltezeit von 1 h wurden mit jeweils vier Thermoelementen gemessen, die gemäß Bild 6 angeordnet waren. Die Thermoelemente 1 - 3, die kurz vor Versuchsbeginn mit einem wärmebeständigen keramischen Kleber auf die Probenvorderseite aufgeklebt worden waren, dienten zur Regelung der einzelnen Ofenheizzonen. Das ebenso befestigte, auf der Probenrückseite befindliche Thermoelement 4 wurde zur Registrierung des Temperaturverlaufs herangezogen.

Vorversuche an Proben mit stärkerer Thermoelementbestückung haben ergeben, daß bei den hier vorliegenden Versuchs- und Aufheizbedingungen das Thermoelement 4 die mittlere Probentemperatur hinreichend genau repräsentiert. Der Temperaturgradient in Richtung Probekörperzentrum ist nach entsprechenden Vorversuchen bei den vorliegenden Aufheizgeschwindigkeiten vernachlässigbar.

2.4.3 Versuchsablauf

Die Probekörper wurden nach mindestens 90tägiger Wasserlagerung unmittelbar vor Versuchsbeginn dem Wasserlagerungsbecken entnommen, oberflächlich abgetrocknet, soweit erforderlich mit Thermoelementen versehen und in die Prüfmaschine eingebaut. Anschließend erfolgte die Fixierung der Meßpunkte und Befestigung der Thermoelemente sowie der Dehnungsgeber. Die Belastung wurde dann entsprechend dem auf Bild 7 dargestellten Schema aufgebracht.

Bei Raumtemperatur (20 °C) wurden die Probekörper mit konstantem, vorgegebenen Belastungsverhältnis ($F_1 : F_2 = 0,0; 0,2; 0,4; 0,66; 1,0$) bis zum Bruch belastet (Belastungsgeschwindigkeit 0,08 N/mm²·s).

Zur Bestimmung der biaxialen Druckfestigkeit wurden die Probekörper mit einer konstanten Vorlast (15 N/mm^2 in der einen Achse, entsprechend dem gewählten Spannungsverhältnis geringer in der anderen Achse) in der Prüfmachine belastet und mit einer konstanten Aufheizgeschwindigkeit auf die Prüftemperatur erwärmt. Die Aufheizgeschwindigkeit betrug bis zu Temperaturen von 70°C 5 K/h und oberhalb 70°C 20 K/h . Nach einer Standzeit von einer Stunde bei der Prüftemperatur wurde der Probekörper kraftgeregelt (konstante Kraftanstieggeschwindigkeit $0,08 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$) unter Vorbehaltung des vorgewählten Spannungsverhältnisses bis zum Bruch belastet. Dabei wurden die Verformungen (entsprechend dem vereinbarten Versuchsumfang) registriert.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Bruchverhalten

Bei den Prüfungen der Betone versagten die Probekörper plötzlich, verbunden mit einem explosionsartigen Knall. Erfahrungsgemäß deutet diese Versagensweise auf ein relativ sprödes Verhalten und ein hohes Energiespeichervermögen (weitgehend elastische Verzerrungen bis unmittelbar vor dem Probekörperversagen) hin.

Die einzelnen Bruchstücke waren im Vergleich zu weniger festem Beton relativ groß.

Die Bruchflächen waren vergleichsweise glatt und verliefen bei den 70°C - und 20°C -Proben stets auch durch die Grobzuschläge. Bei den bei 120°C geprüften Proben war eine leichte Tendenz der Verlagerung der Rißflächen in die Kontaktzone Grobzuschlag/Feinmörtelmatrix zu beobachten. Im übrigen unterschieden sich die Bruchbilder der bei unterschiedlichen Temperaturen getesteten Proben nicht. Die makroskopischen Bruchflächen verliefen im wesentlichen parallel zur größten aufgebrachten Spannung (vgl. Bild 8), was u. a. darauf hindeutet, daß durch Verwendung der speziellen Belastungsbürsten kaum Querdehnungsbehinderung auftritt und im Versuch im wesentlichen nur die angestrebten reinen zweiachsigen Spannungszustände auftraten.

Im Bruchverhalten der beiden Betone gab es nur geringe Unterschiede. Es ließ sich lediglich feststellen, daß das Versagen des Rheinkiesbetons generell etwas weicher als das des Basaltbetons erfolgte.

3.2 Bruchspannungen bei biaxialer Belastung

Die erzielten Versuchsergebnisse an Basaltbeton sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Es sind die aus jeweils mindestens drei Einzelversuchen gemittelten Bruchspannungen ($\sigma_{1,u}$, $\sigma_{2,u}$) aufgeführt. Außerdem enthält die Tabelle noch Angaben über Prüftemperaturen und die Spannungsverhältnisse ($\kappa = \sigma_{2,u} / \sigma_{1,u}$).

Daneben ist das Verhältnis von Bruchspannung bei symmetrisch-biaxialer Beanspruchung zu einaxialer Bruchspannung ($\sigma_{\kappa=1,0} / \sigma_{\kappa=0,0}$) und das Verhältnis von größter biaxialer Bruchspannung (σ_{\max}) zu einaxialer Bruchspannung ($\sigma_{\kappa=0,0}$) aufgeführt.

Bild 9 zeigt die gemittelten biaxialen Bruchspannungen für die drei Prüftemperaturen, aufgetragen in der Ebene der beiden aufgetragenen Hauptspannungen. Für jeweils eine Temperatur wurden die bei einem bestimmten Spannungsverhältnis gemittelten und auf die einaxiale Probekörperdruckfestigkeit bei Raumtemperatur bezogenen Festigkeiten durch eine Bruchgrenzkurve verbunden.

Die für den Rheinkiesbeton ermittelten Bruchspannungen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Auf Bild 10 sind die biaxialen Bruchgrenzkurven dargestellt.

Der Vergleich der an beiden Betonen gewonnenen Werte läßt folgende zusammenfassende Aussagen zu:

- Die Bruchspannungen der stärker belasteten Probekörperachse ist - unabhängig von der Art des untersuchten Betons - bei allen Prüftemperaturen und bei allen Spannungsverhältnissen höher als die reinen einaxialen Bruchspannungen. Der "Festigkeitszuwachs" gegenüber der einaxialen Festigkeit ist schon bei nur geringer Beanspruchung in der zweiten Achse recht deutlich.

- Die Festigkeitserhöhung bei zweiaxialer Beanspruchung ist bei den höheren Temperaturen größer als bei Raumtemperatur.
- Das Spannungsverhältnis, bei dem die größte biaxiale Festigkeit erreicht wird, verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zu größeren Werten hin.

Bei detaillierterer Betrachtung lassen sich noch folgende Feststellungen treffen: Hinsichtlich des Festigkeitsverlusts bei erhöhten Temperaturen unterscheiden sich die beiden Betone geringfügig. Bei 70 °C verringert sich die Festigkeit des Basaltbetons auf 0,95 der entsprechenden Werte bei Raumtemperatur; beim Rheinkiesbeton geht die Festigkeit auf 0,92 der Raumtemperatur zurück. Bei 120 °C ist die Festigkeit des Basaltbetons auf 0,85 der Festigkeit bei Raumtemperatur abgefallen, während beim Rheinkiesbeton der entsprechende Wert 0,90 beträgt.

Die maximale Festigkeitserhöhung unter biaxialer Druckbeanspruchung ist bei beiden Betonen etwa gleich; tendenzmäßig fällt die Festigkeitserhöhung beim Rheinkiesbeton mit 32 % bei 30 °C, 34 % bei 70 °C und 34 % bei 120 °C etwas niedriger aus als beim Basaltbeton mit 33 % bei 20 °C, 33 % bei 70 °C und 35 % bei 120 °C. Interessant ist allerdings, daß das Spannungsverhältnis, bei dem die maximale Festigkeitserhöhung erzielt wird, beim Rheinkiesbeton für alle drei Temperaturen bei kleineren Werten als beim Basaltbeton liegt.

Die Festigkeit bei symmetrisch biaxialer Druckbeanspruchung erreicht für beide Betone bei erhöhten Temperaturen etwa gleiche Werte (23 - 25 % Festigkeitssteigerung gegenüber einaxialer Beanspruchung).

Insgesamt kann gesagt werden, daß - wie der Verlauf der Bruchgrenzkurven zeigt - das zweiaxiale Festigkeitsverhalten sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen für beide Betone - bis auf graduelle Unterschiede - etwa gleich ist.

Zusätzlich zu den Festigkeitsuntersuchungen bei 20, 70 und 120 °C wurden - obwohl nicht Teil des Auftrags - auf Kosten des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig die biaxialen Druckfestigkeiten bei 200 °C ermittelt. Die sie verbindenden biaxialen Bruchgrenzkurven sind auf Bild 11 dargestellt.

Beim Basaltbeton ist unter einaxialer Druckbeanspruchung eine Zunahme der Festigkeit bei 200 °C gegenüber 70 und 120 °C zu beobachten: es wird die 0,95fache Druckfestigkeit von 20 °C ermittelt. Der Verlauf der 200 °C-Bruchgrenzkurve weicht nur wenig vom Verlauf der Bruchgrenzkurven bei den niedrigeren Temperaturen ab, d. h. die Festigkeitserhöhungen unter biaxialer Beanspruchung zeigen in etwa gleiche Werte.

Beim Rheinkiesbeton ist unter einaxialer Druckbeanspruchung bei 200 °C nur eine leichte Festigkeitsminderung gegenüber der bei 20 °C zu beobachten. Der Verlauf der biaxialen 200 °C-Bruchgrenzkurve weicht nur unwesentlich von der der Bruchgrenzkurven der niedrigeren Temperaturen ab, d. h. auch hier sind die Festigkeitserhöhungen unter biaxialer Druckbeanspruchung in etwa gleich.

Für beide Betone gilt, daß das Maximum der biaxialen Festigkeitserhöhung bei 200 °C zu höheren Spannungsverhältnissen als bei niedrigeren Temperaturen verschoben wird und daß die Festigkeitswerte bei diesen Spannungsverhältnissen als auch bei symmetrisch biaxialer Beanspruchung höher sind als bei 20 °C.

3.3 Prüfeinflüsse auf die Probekörperdruckfestigkeit bei Raumtemperatur

Im Verlauf der Festigkeitsuntersuchungen wurden Versuche durchgeführt, um den Einfluß der Lasteintragung und der Belastungsgeschwindigkeit auf die einaxiale Probekörperdruckfestigkeit zu ermitteln.

Als Lasteintragungssysteme wurden starre Platten und Belastungsbürsten, die üblicherweise bei der Durchführung von biaxialen Belastungsversuchen von uns Verwendung finden, verglichen. Die Belastungssteigerungen bis zum Bruch der Probekörper wurden mit den Geschwindigkeiten $\dot{\sigma}_1 = 0,08 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$, entsprechend der bei wissenschaftlichen Biaxialversuchen üblichen Belastungsgeschwindigkeit, mit $\dot{\sigma}_2 = 0,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$, entsprechend der in DIN 1045 vorgegebenen Belastungsgeschwindigkeit und mit $\dot{\sigma}_3 = 33,3 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ vorgenommen. Die letztgenannte Belastungsgeschwindigkeit entspricht dabei der von der Prüfanlage und ihrer Hydraulik schnellstmöglich aufzubringenden Lastanstiegsgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Versuche mit dem Rheinkiesbeton sind auf Bild 12 dargestellt. Der Bezugswert β_0 ist die Druckfestigkeit, wie sie mit Belastungsbürsten und der Belastungsgeschwindigkeit δ_1 erreicht wird. Die Werte, erzielt mit den höheren Belastungsgeschwindigkeiten, liegen rd. 30 % höher. Interessant dabei ist, daß die beiden Werte sich kaum unterscheiden, obwohl die Belastungsgeschwindigkeiten sich um rd. das 60fache unterscheiden.

Bei der Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit mit starren Lasteintragsplatten werden schon bei der geringsten Belastungsgeschwindigkeit recht hohe Werte erzielt (rd. 18 % höher als bei der gleichen Geschwindigkeit mit Bürsten).

Der Vergleich der mit allen drei Belastungsgeschwindigkeiten erzielten Festigkeiten zeigt, daß sie nur wenig voneinander abweichen: beim Einsatz von starren Platten hat die Belastungsgeschwindigkeit also keinen großen Einfluß auf das Festigkeitsergebnis.

3.4 Spannungs-Dehnungs-Linien

Zusätzlich zu der Bestimmung der biaxialen Druckfestigkeit bei 70 °C wurden die lastabhängigen Verformungen in den Hauptachsen gemessen.

Wie bereits erwähnt, erlaubt die Verwendung von Belastungsbürsten die Eintragung einer in Richtung der Hauptachsen der Scheibenebene wirkenden Belastung ohne gleichzeitige Behinderung der Verformungen der Querrichtungen. Dadurch wird in der Scheibenebene ein ebenes und gleichmäßiges Spannungsfeld erzeugt, das einen zu den Hauptspannungen gleichgerichteten Verformungszustand verursacht.

Die Anordnung von jeweils zwei Meßstrecken auf beiden freien Probekörperoberflächen (siehe Bild 5) erlaubt die Überwachung der Gleichmäßigkeit der Verformungsverteilung während der gesamten Aufheiz- und Belastungsphase. Durch die Länge der Meßstrecken, je 14 cm zur Bestimmung von ϵ_1 und ϵ_2 und 5 cm zur Bestimmung von ϵ_3 , werden mittlere Betonverformungen gemessen, die örtliche, durch den inhomogenen Stoffaufbau bedingte Störungen nicht wirksam werden lassen.

Die nach dem auf Bild 7 gezeigten Verfahren ermittelten lastabhängigen Dehnungen ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 bei der konstanten Prüftemperatur von 70 °C sind für die untersuchten Spannungsverhältnisse (siehe Kap. 2.1) auf den folgenden Bildern dargestellt. Das letzte Bild für den jeweiligen Beton zeigt eine Übersicht über alle geprüften Spannungsverhältnisse, die Einzeldarstellungen befinden sich davor.

Grundsätzlich kann gesagt werden, daß die Dehnungen in ihrer Größe vom Belastungsgrad, vom Spannungsverhältnis und von der Temperatur abhängen. Die Dehnungen in allen drei Achsrichtungen nehmen mit steigender Last zu und zeigen bei hohen Belastungsgraden eine nichtlineare Abhängigkeit zur größten Hauptspannung, was auf einen hohen Anteil plastischer Verformungen hinweist.

Der Verlauf der σ_1 - ϵ_1 -Kurven zeigt eine starke Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis. In dieser am stärksten belasteten Achse ergeben sich maximale Dehnungen für ein Spannungsverhältnis $\sigma_2 : \sigma_1 = 0,4$. Der Einfluß des Spannungsverhältnisses auf den σ_1 - ϵ_2 -Verlauf ist sehr groß: ϵ_2 verändert sich bei steigenden Beanspruchungsverhältnissen von positiven Werten (Querdehnung bei einaxialer Beanspruchung) zu maximalen negativen Dehnungen (Stauchungen) im symmetrisch zweiaxialen Fall.

Die Dehnungen in der unbelasteten Achse, ϵ_3 , erreichen unter dem Einfluß von großem Spannungsverhältnis die größten Werte, die neben elastischen und plastischen Verformungen aus der Querdehnung einen Verformungsanteil aufweisen, der durch die Rißaufweitungen senkrecht zu den Belastungsrichtungen entsteht. Die maximalen Verformungen in der lastfreien Achse ergeben sich bei dem Belastungsverhältnis $\sigma_2 : \sigma_1 = 0,66$.

Ein Vergleich des Verformungsverhaltens zwischen Basalt- und Rheinkiesbeton zeigt, daß der Rheinkiesbeton etwas größere Dehnungen als der Basaltbeton aufweist. Dies betrifft insbesondere die Stauchungen in der immer am stärksten belasteten Achse 1.

4. Zusammenfassung, offene Probleme

In dem vorliegenden Abschlußbericht wird eine Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten unter biaxialen Druckbeanspruchungen bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen gegeben. Untersucht wurden der Basaltbeton und der Rheinkiesbeton.

Ausgehend von der Aufgabenstellung wird ausführlich über die Probenvorbereitung und die Art der Versuchsdurchführung berichtet.

Abschließend werden die durchgeführten Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten zusammengestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Bruchspannungen der stärker belasteten Probekörperachse sind unabhängig von der Art des untersuchten Betons bei allen Prüftemperaturen und bei allen Spannungsverhältnissen höher als die reinen einaxialen Bruchspannungen. Der "Festigkeitszuwachs" gegenüber der einaxialen Festigkeit ist schon bei nur geringer Beanspruchung in der zweiten Achse recht deutlich.
- Die Festigkeitserhöhung bei zweiachsender Beanspruchung ist bei den höheren Temperaturen größer als bei Raumtemperatur.
- Das Spannungsverhältnis, bei dem die größte biaxiale Festigkeit erreicht wird, verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zu größeren Werten hin.
- Die σ - ϵ -Linien zeigen in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis charakteristische Veränderungen. Mit steigender Temperatur werden die Kurven beim Spannungsverhältnis 1 : 0 - nahezu unabhängig von der Betonart - deutlich flacher. Zweiachsige Belastung wirkt diesem Effekt deutlich entgegen.

Außerdem wird neben der schon erwähnten Zunahme der Festigkeit unter biaxialen Druckspannungsverhältnissen auch eine Zunahme der Bruchdehnungen bei $\sigma_2/\sigma_1 = 0,4$ für die Dehnungen in allen drei Achsen beobachtet. Die Dehnung ϵ_2 erfährt mit zunehmendem Spannungsverhältnis die größten Veränderungen: von

einer leichten positiven Dehnung bei $\sigma_2/\sigma_1 = 0,0$ verändert sie sich zu negativen Werten für Spannungsverhältnisse $\sigma_2/\sigma_1 \geq 0,4$.

Die bisher aufgrund der durchgeführten Versuche ermittelten Ergebnisse beschreiben das biaxiale Verhalten von Beton unter Druckbeanspruchung noch nicht hinreichend, insbesondere unter Berücksichtigung der thermisch und hygrisch instationären Bedingungen in einem Spannbeton-Reaktordruckbehälter.

Notwendig wären Untersuchungen unter instationären Temperaturbedingungen. Als zweckmäßig haben sich dabei sog. "Warmkriechversuche" und Zwängungsversuche herausgestellt. Bei den Warmkriechversuchen werden die Probekörper bei Raumtemperatur in die Prüfmaschine eingebaut und mit einer vorgegebenen Belastungshöhe und vorgegebenem Spannungsverhältnis belastet. Anschließend erfolgt die Aufheizung der Proben mit konstanter Geschwindigkeit (z. B. 20 K/h) auf die gewählte Maximaltemperatur (200 °C). Dabei werden die Anfangskräfte konstant gehalten und die Verformungen gemessen.

Bei den Zwängungsversuchen werden die Probekörper entsprechend den vorgewählten Belastungsverhältnissen bei Raumtemperatur belastet. Die dabei gemessenen Verformungen in den belasteten Achsen werden während der nachfolgenden Aufheizung konstant gehalten, die sich dabei aufbauenden Kräfte werden gemessen.

Zur Untersuchung des Betons unter den hygrischen Verhältnissen, wie sie in einem Druckbehälter vorliegen, sind die unterschiedlichen Versuchsarten an versiegeltem und unversiegeltem Beton durchzuführen.

Störfalltemperaturen bis 300 °C sollten in die Untersuchungen mit einbezogen werden.

5. Schrifttum

- /1/ Schneider, U.; Diederichs, U.; Ehm, C.; Hinrichsmeyer, K.: "Auswirkung hoher Temperaturen auf das biaxiale Festigkeits- und Verformungsverhalten". Arbeitsbericht für den Zeitraum 1981 - 1983, S. 115 - 143, Teilprojekt B 3, Sonderforschungsbereich 148, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig.
- /2/ Schneider, U.; Ehm, C.; Diederichs, U.: "Prüfanlage für Beton unter biaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen". Mitteilungsblatt für die Amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, H. 22/23, S. 39 - 45, Bad Harzburg, 1982/83.
- /3/ Ehm, C.; Schneider, U.; Kordina, K.: "Fracture of Concrete under Biaxial High Temperature Tests." 6th International Conference on Fracture, New Delhi, Dez. 1984.
- /4/ Diederichs, U.; Ehm, C.: HTR-Betonversuche - Biaxiale Druckversuche. Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1984.
- /5/ Weber, A.: Spezifikation für F+E-Arbeiten der EG-HTR, PSP-Nr. 5131-01: Beton, HRB-Fassung C, vom 27.01.1984.
- /6/ Weber, A.: "Auslegungsgrundlagen für den HTR-SBB", HRB-Bericht BA 3166 vom 15.09.1980.
- /7/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung. Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1984.
- /8/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung - Rheinkiesbeton. Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juli 1985.
- /9/ Weigler, H.; Becker, G.: "Untersuchungen über das Bruch- und Verformungsverhalten von Beton bei zweiachsiger Beanspruchung". Heft 157 des DAfStb., Berlin 1963.
- /10/ Hilsdorf, H.: "Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons." Heft 173 des DAfStb., Berlin 1963.

Tabelle 1: Betonrezepturen

	Rheinkiesbeton 16 mm	Basaltbeton 16 mm	
Zementgehalt (HOZ 45 L, HOESCH)	490	390	kg/m ³
Wassergehalt	160	176	kg/m ³
Wasser-Zement-Wert	0,40	0,45	-
Zusatzstoff (EFA Füller Typ BM II)	50	60	kg/m ³
Zuschlag	1778	1854	kg/m ³
Zusatzmittel; Plastiment Retarder	0,2	0,2	% v. Z.G.
Sikament 20	~ 1,2	~ 1,2	% v. Z.G.

Tabelle 2: Betoneigenschaften der für die biaxialen Druckversuche verwendeten Betone

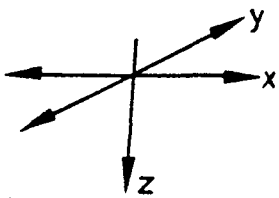
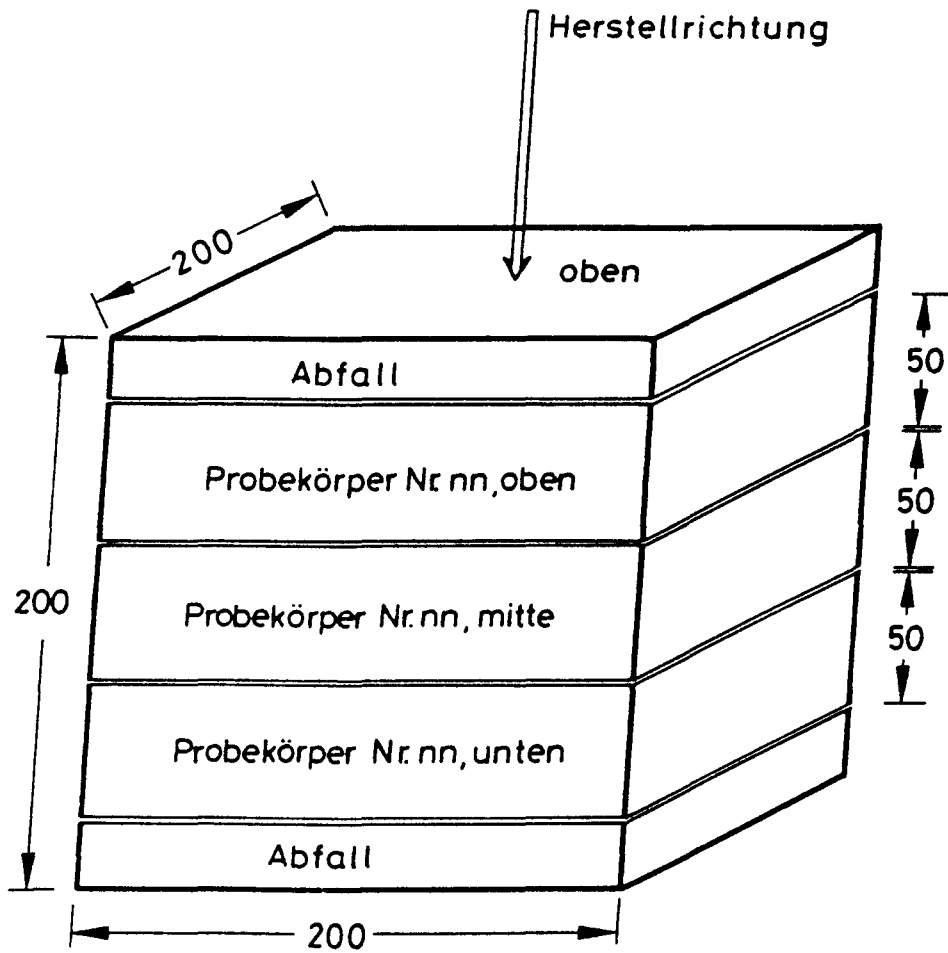
B a s a l t b e t o n			
Frischbeton (nach Dosierung des Fließmittels)	Rohdichte	2,53	kg/dm ³
	Ausbreitmaß	38,0	cm
	Verdichtungsmaß	1,07	-
	Luftporengehalt	1,20	Vol.-%
Festbeton	Würfeldruckfestigkeit (15/15/15)		
	7 Tage	49,0	N/mm ²
	28 Tage	68,0	N/mm ²
	90 Tage	73,0	N/mm ²
	Zylinderdruckfestigkeit (15/30) 90 Tage	71,0	N/mm ²
R h e i n k i e s b e t o n			
Frischbeton (nach Dosierung des Fließmittels)	Rohdichte	2,43	kg/dm ³
	Ausbreitmaß	32,3	cm
	Verdichtungsmaß	1,05	-
	Luftporengehalt	1,0	Vol.-%
Festbeton	Würfeldruckfestigkeit (15/15/15)		
	7 Tage	52,0	N/mm ²
	28 Tage	66,0	N/mm ²
	90 Tage	71,0	N/mm ²
	Zylinderdruckfestigkeit (15/30) 90 Tage	67,0	N/mm ²

Tabelle 3: Ergebnisse der biaxialen Druckversuche an Basaltbeton

T [°C]	κ	$\sigma_{1,u}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,u}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{u,\kappa=1,0}}{\sigma_{u,\kappa=1,0}}$	$\sigma_{u,max}/\sigma_{u,\kappa=0,0}$
20	0,0	49,0	0,0	1,17	1,33 ($\sigma_{u,max}$ bei $\kappa = 0,55$)
	0,2	57,0	11,4		
	0,4	63,5	25,4		
	0,66	64,5	42,9		
	1,0	57,5	57,5		
70	0,0	46,5	0,0	1,22	1,33 ($\sigma_{u,max}$ bei $\kappa = 0,59$)
	0,2	54,5	10,9		
	0,4	60,5	24,2		
	0,66	62,0	40,9		
	1,0	56,5	56,5		
120	0,0	41,5	0,0	1,25	1,35 ($\sigma_{u,max}$ bei $\kappa = 0,67$)
	0,2	47,5	9,5		
	0,4	53,0	21,2		
	0,66	56,0	37,0		
	1,0	52,0	52,0		

Tabelle 4: Ergebnisse der biaxialen Druckversuche an Rheinkiesbeton

T [°C]	κ	$\sigma_{1,u}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,u}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{u,\kappa=1,0}}{\sigma_{u,\kappa=0,0}}$	$\frac{\sigma_{u,max}}{\sigma_{u,\kappa=0,0}}$
20	0,0	45,5	0,0	1,22	1,32 ($\sigma_{u,max}$ bei $\kappa = 0,53$)
	0,2	54,0	10,8		
	0,4	59,5	23,8		
	0,66	60,0	39,6		
	1,0	55,5	55,5		
70	0,0	42,0	0,0	1,23	1,34 ($\sigma_{u,max}$ bei $\kappa = 0,54$)
	0,2	51,5	10,3		
	0,4	56,0	22,4		
	0,66	56,5	37,3		
	1,0	51,5	51,5		
120	0,0	41,0	0,0	1,24	1,34 ($\sigma_{u,max}$ bei $\kappa = 0,55$)
	0,2	51,0	10,2		
	0,4	54,5	21,8		
	0,66	55,0	36,3		
	1,0	51,0	51,0		



x: Prüfrichtung P_x ; Sägerichtung
y: Prüfrichtung P_y
z: Herstellrichtung

Bild 1: Herstellung der Probekörper

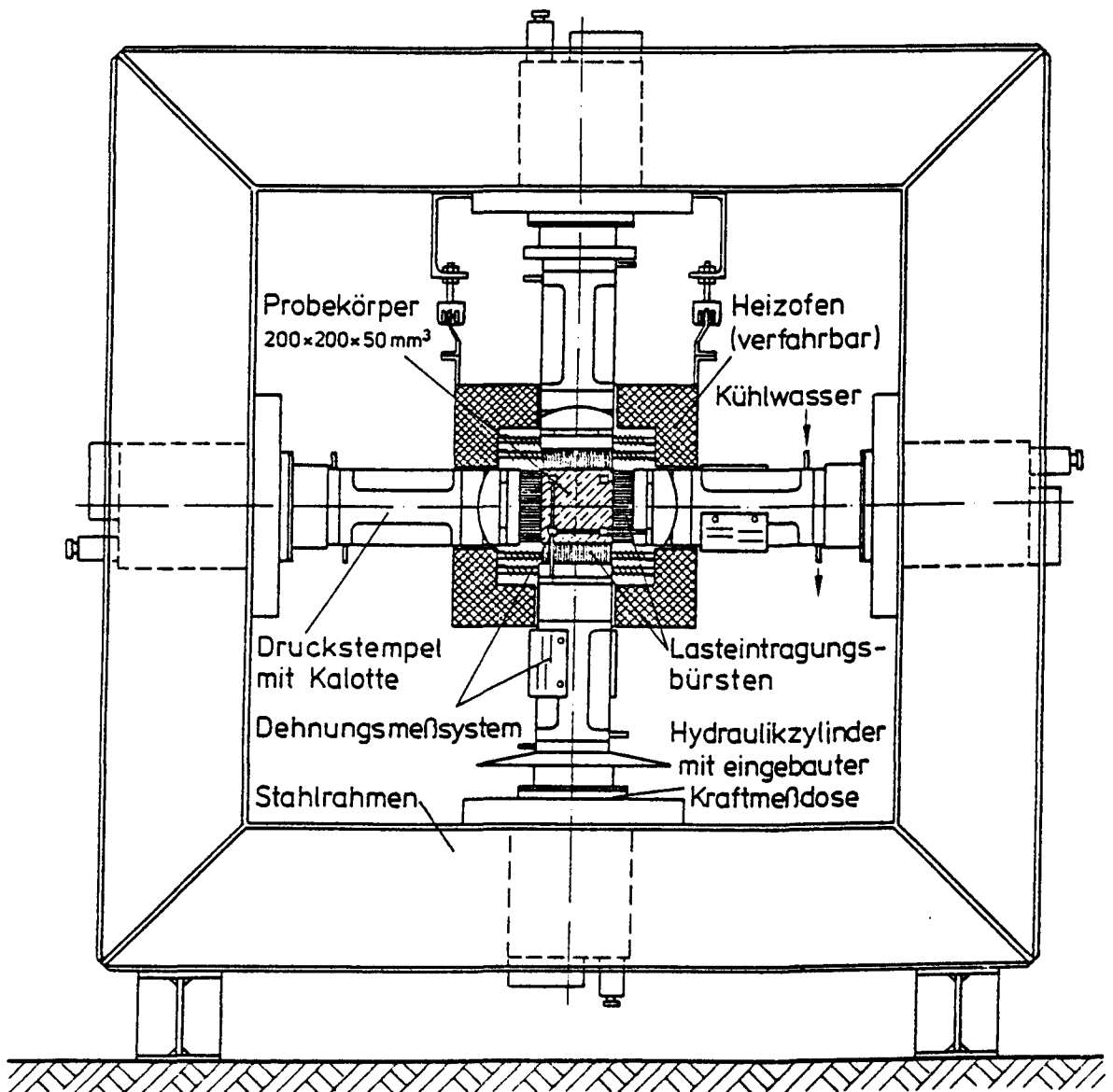
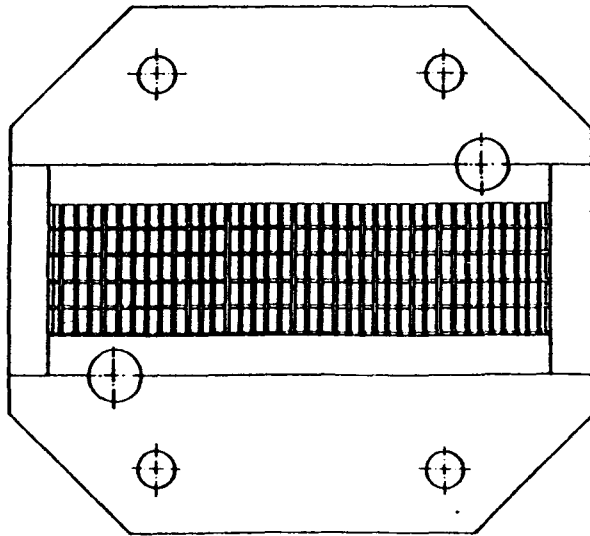
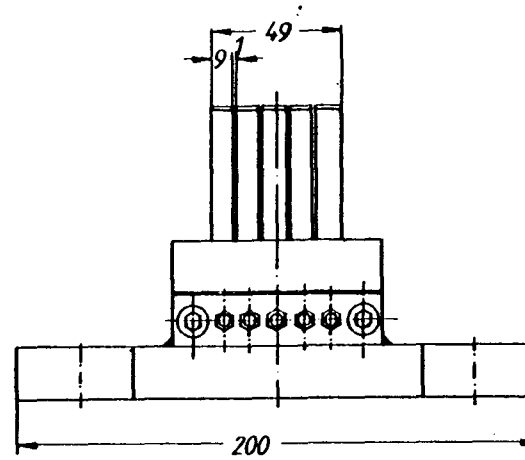
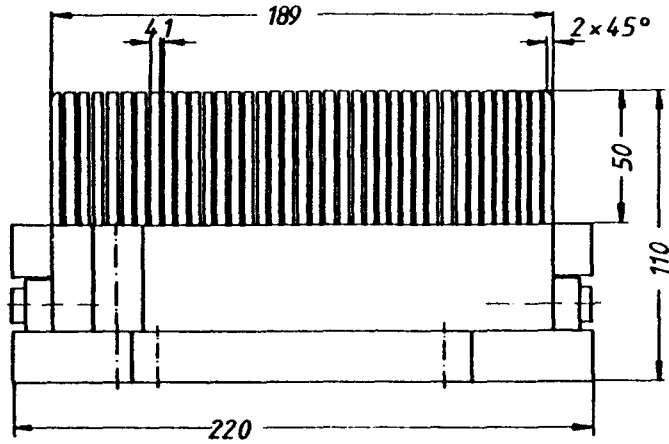


Bild 2: Aufbau des Prüfstandes



Lasteintragungskonstruktion

Bürste I

Material : X15CrNiSi2520

Einsatz : bis 1000 kN

bis 800 °C

Bild 3: Lasteintragungskonstruktion

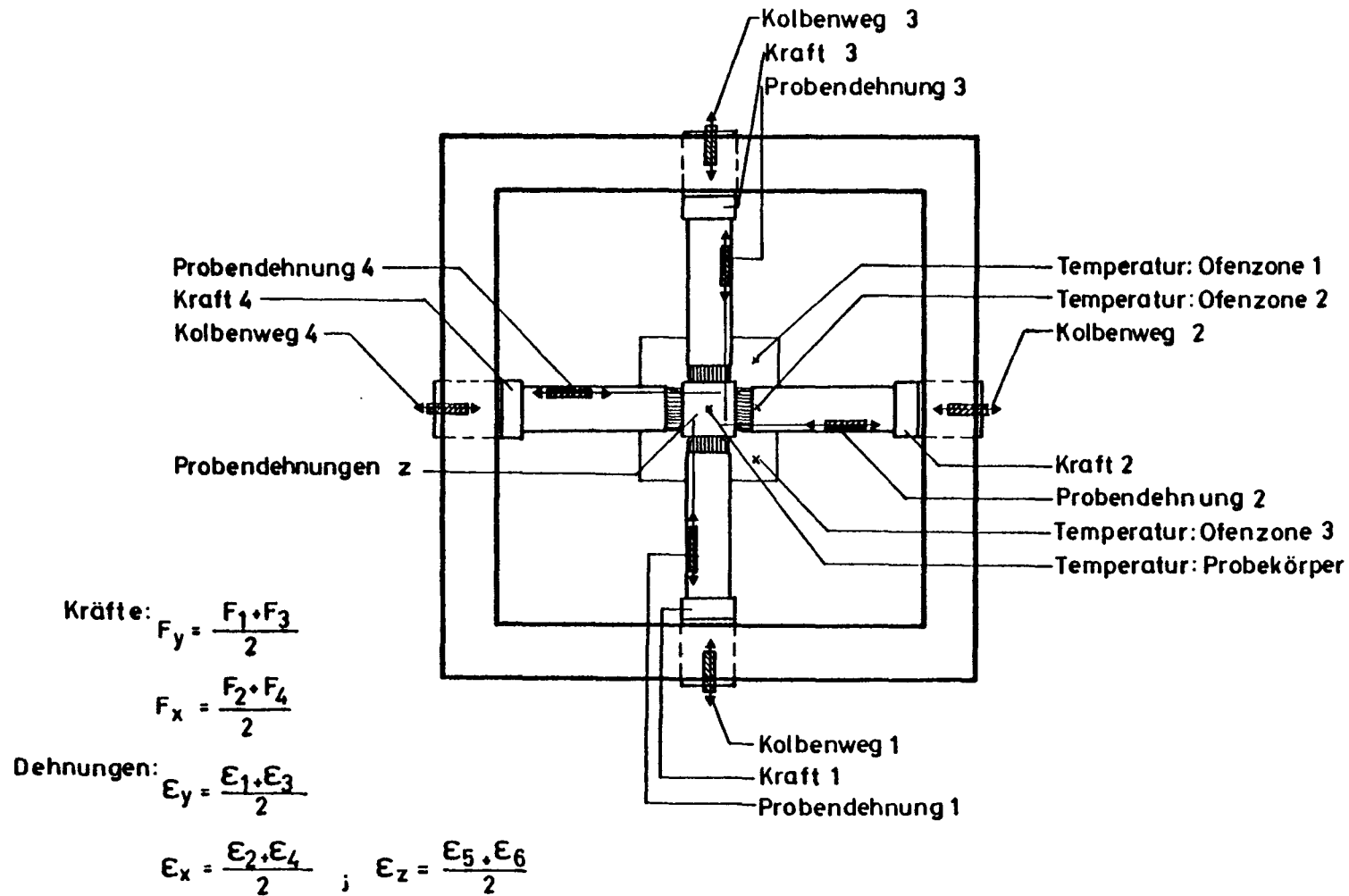


Bild 4: Meßgrößen

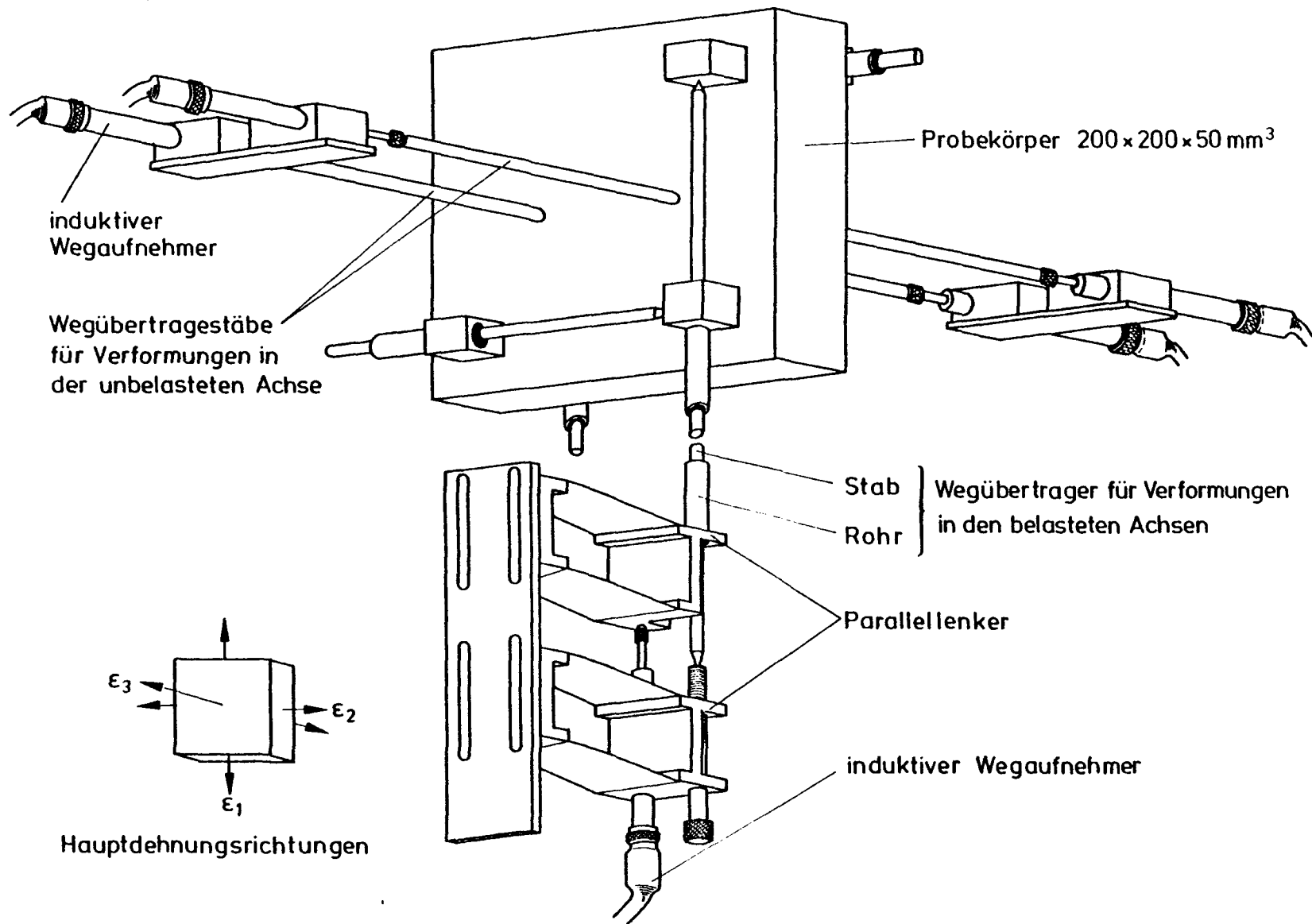


Bild 5: Dehnungsmeßsystem

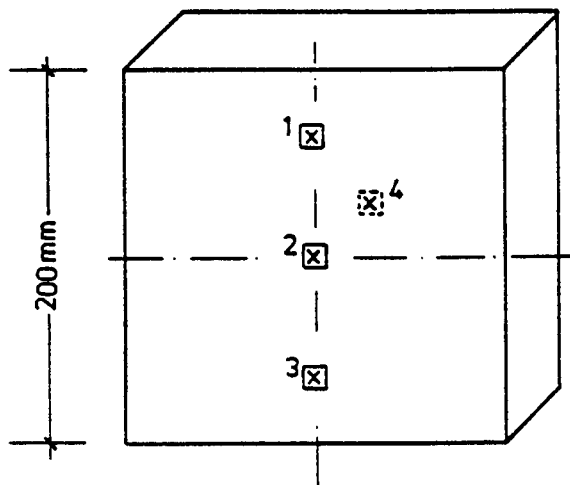


Bild 6: Temperaturmeßstellen

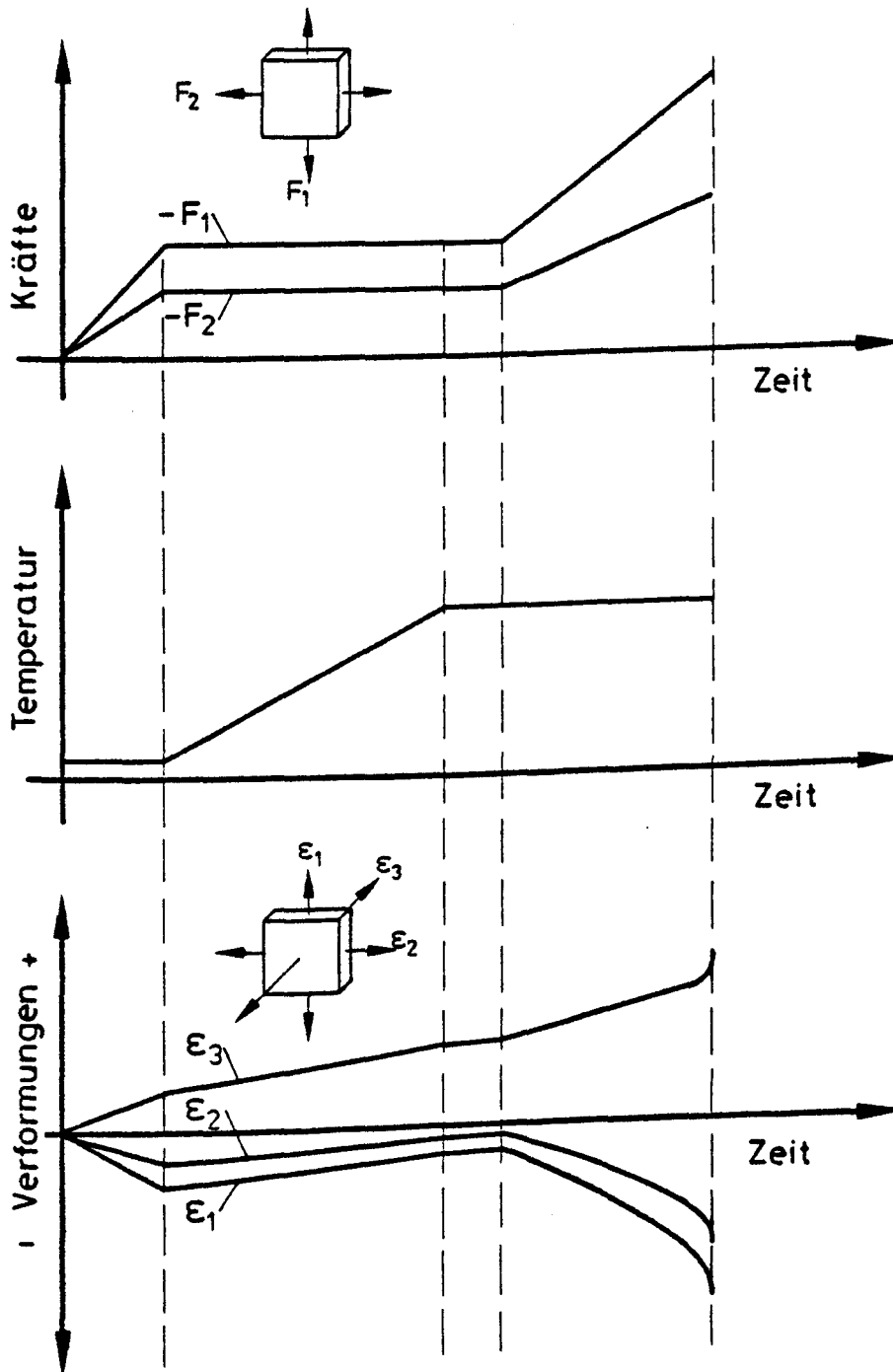


Bild 7: Temperatur-Last-Zeit-Programm zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

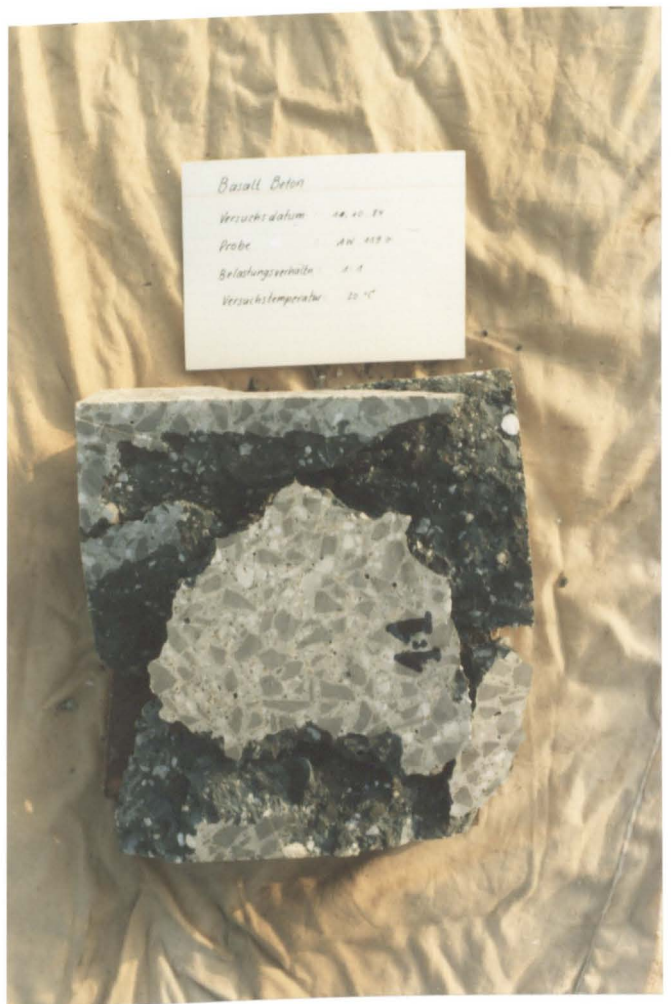
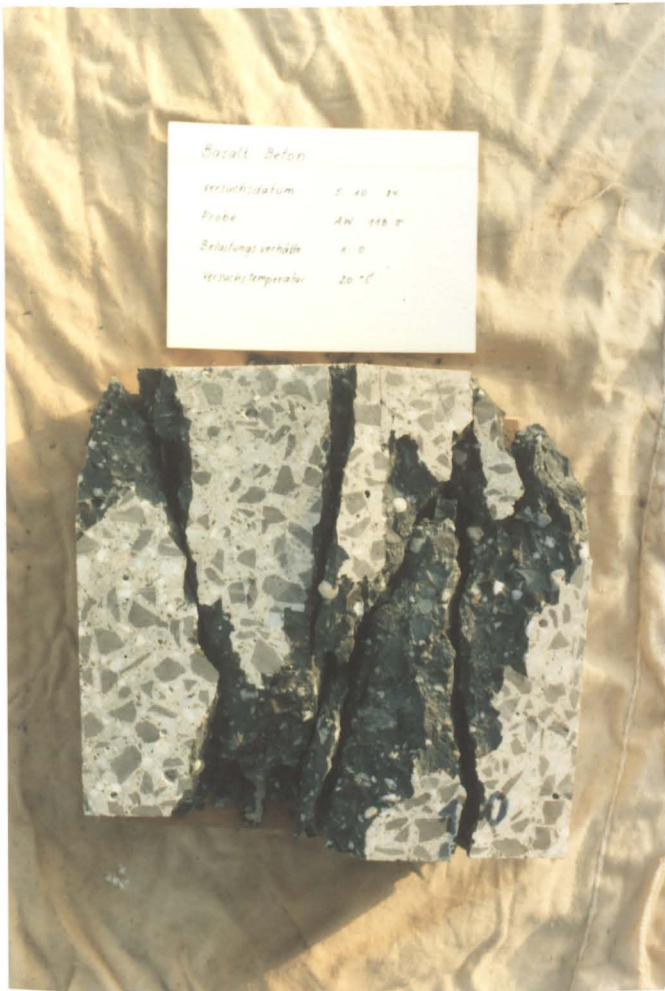


Bild 8 a: Rißverteilung nach einaxialer und symmetrisch biaxialer Bruchbeanspruchung (Basaltbeton)

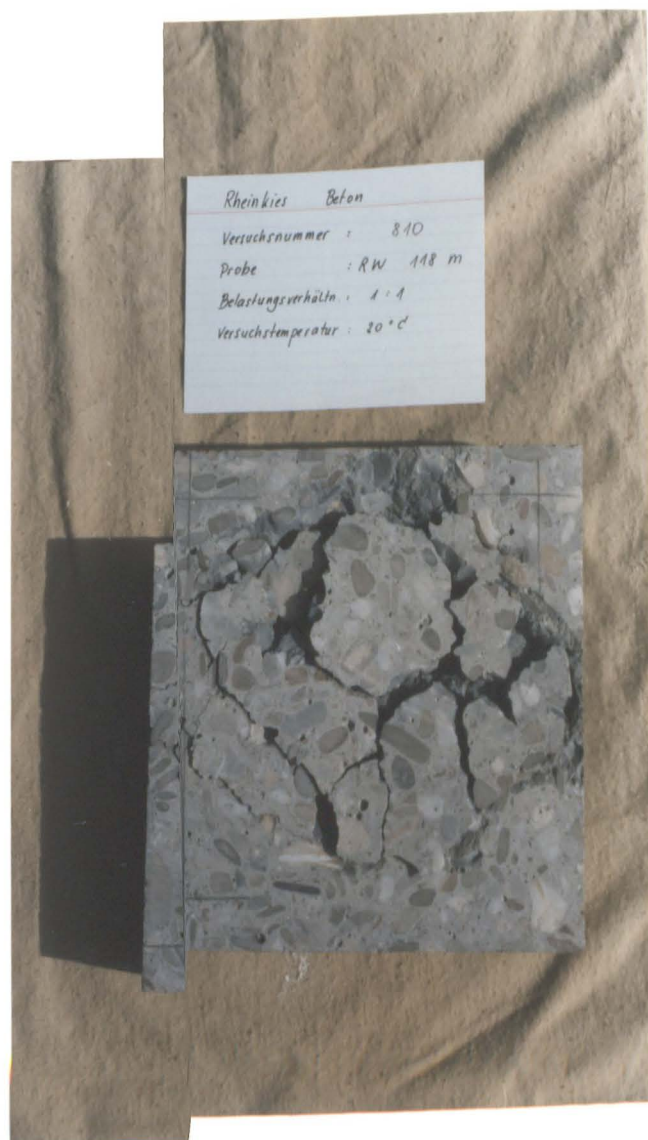
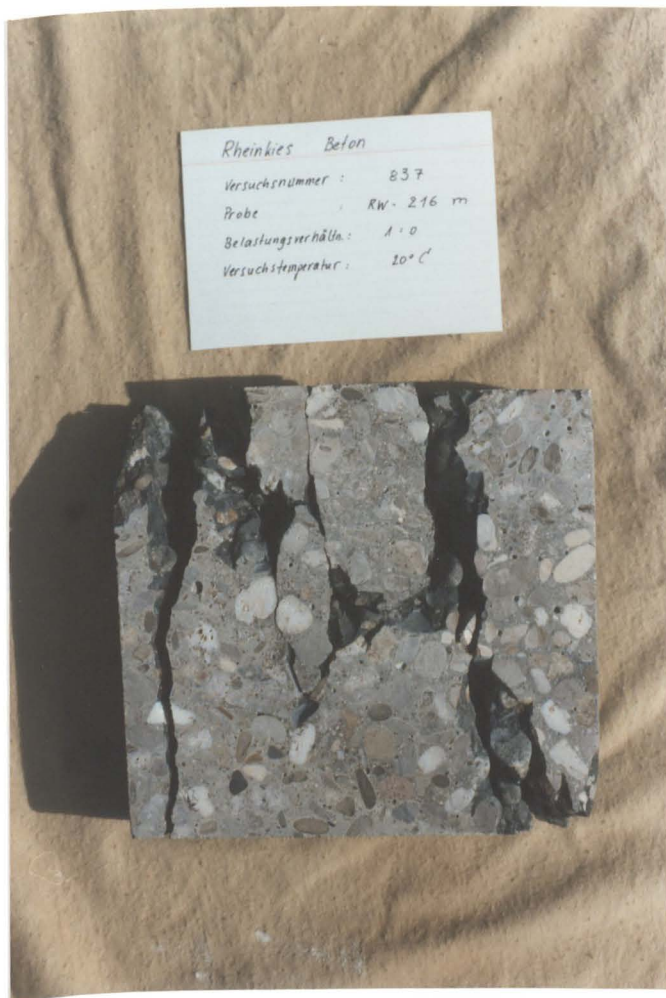


Bild 8 b: Rißverteilung nach einaxialer und symmetrisch biaxialer Bruchbeanspruchung (Rheinkiesbeton)

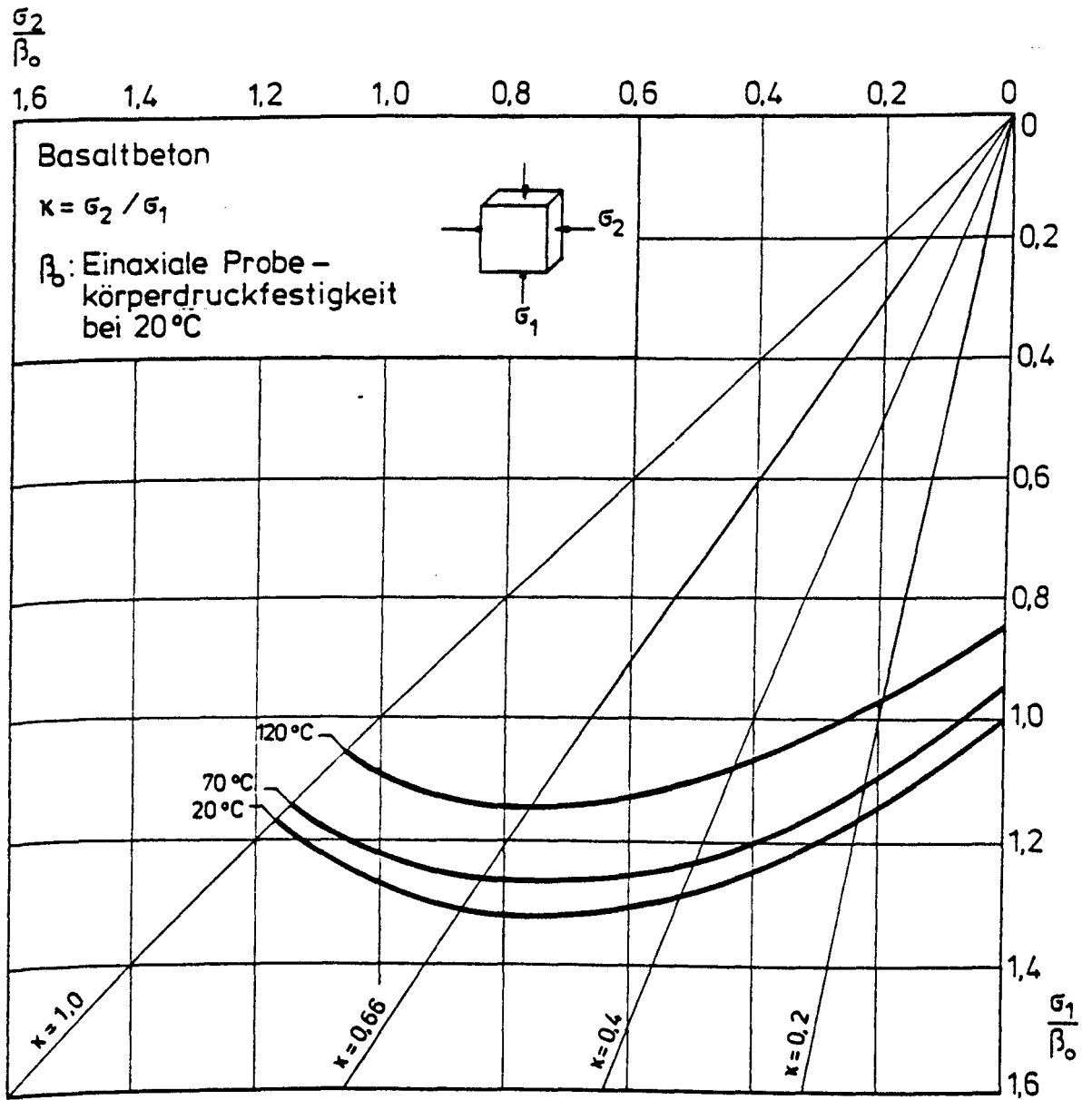


Bild 9: Biaxiale Bruchgrenzkurven: Basaltbeton

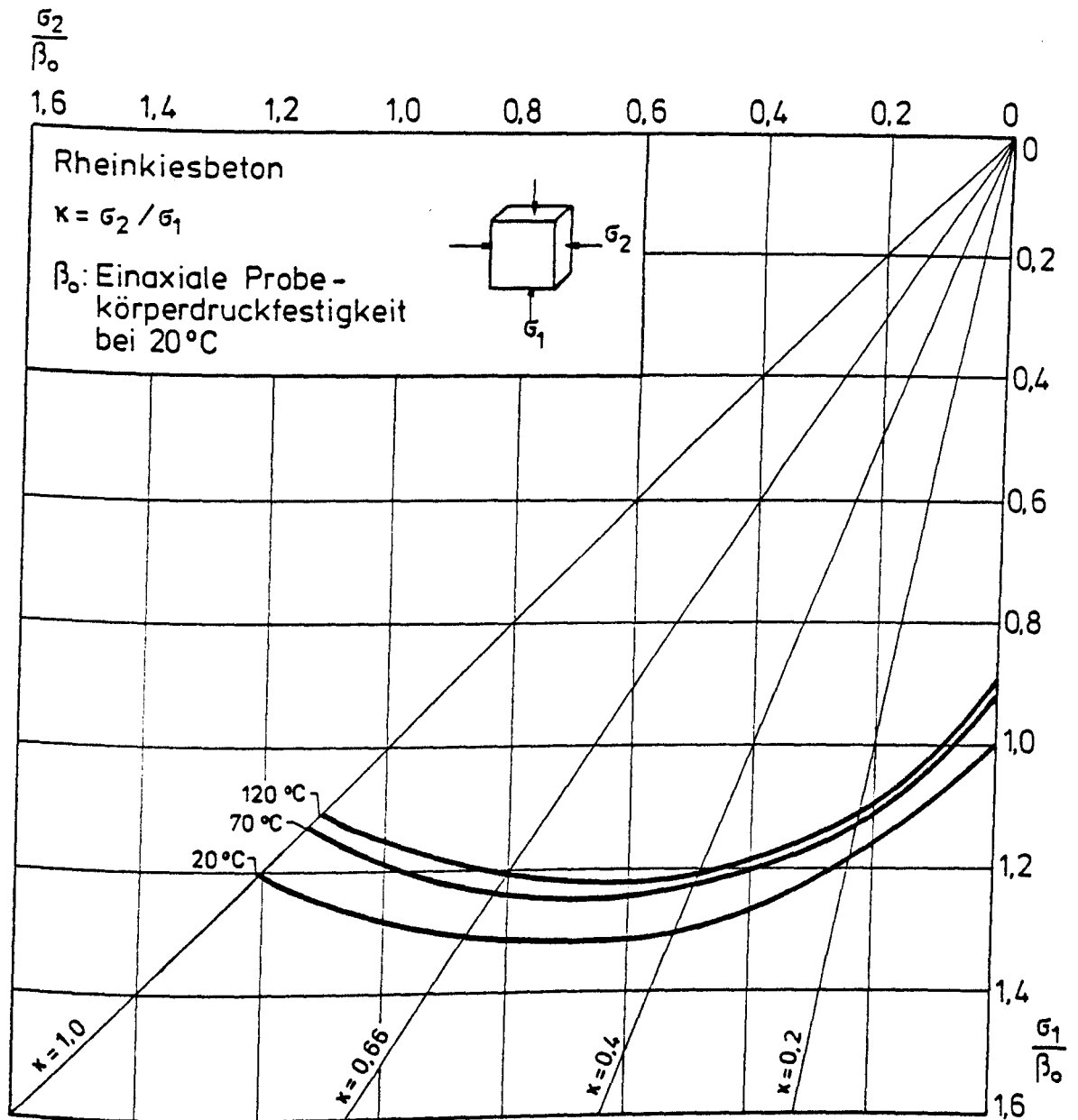


Bild 10: Biaxiale Bruchgrenzkurven: Rheinkiesbeton

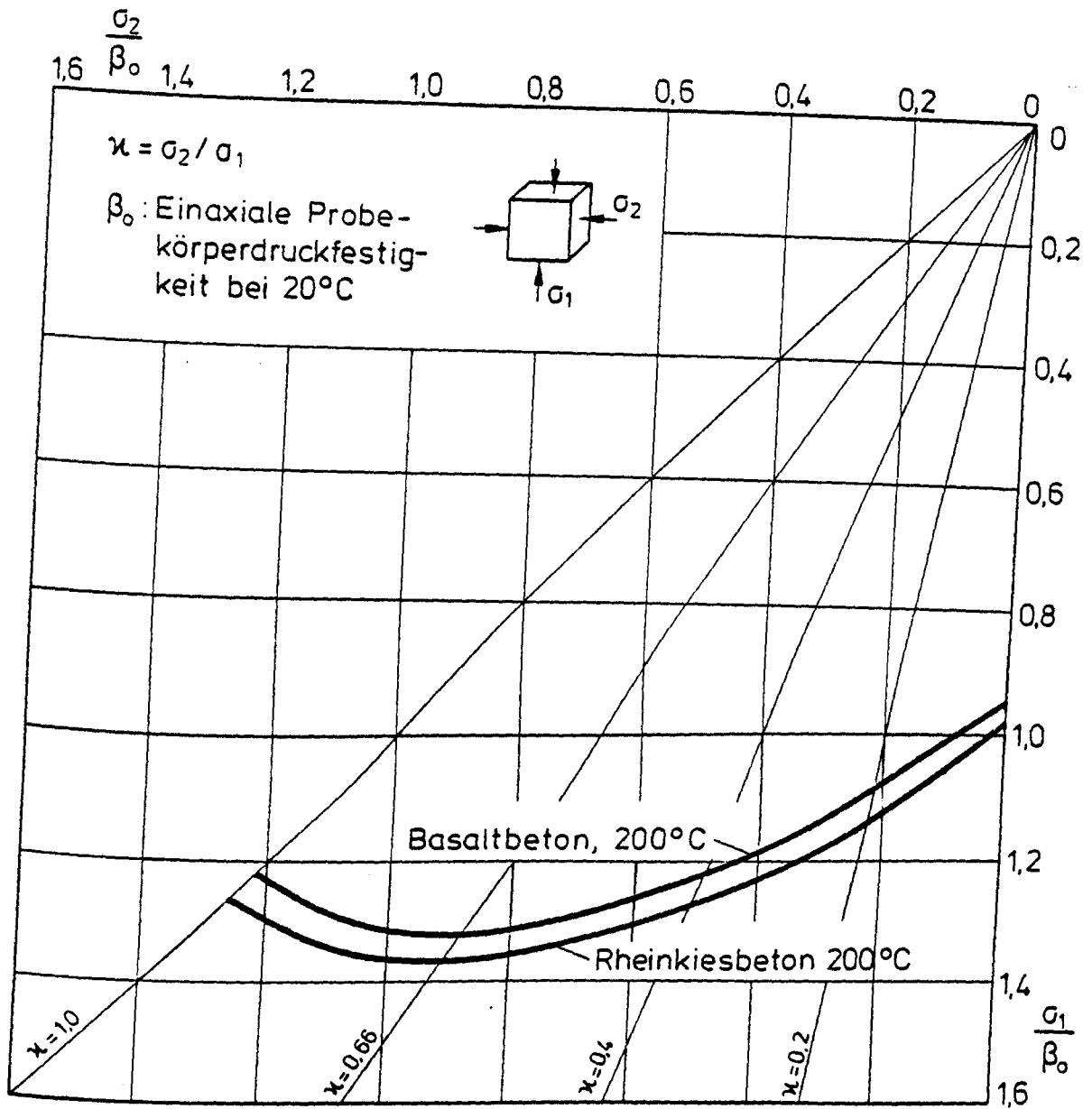
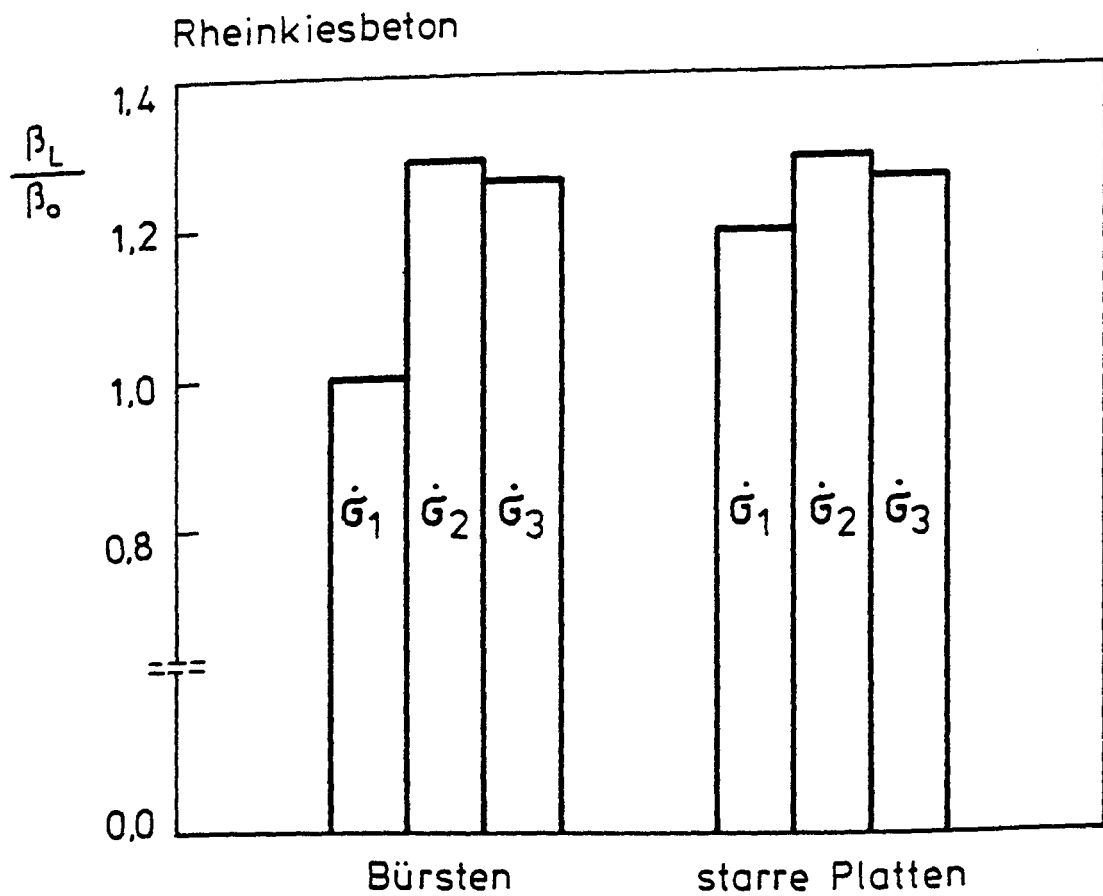


Bild 11: Biaxiale Bruchgrenzkurven bei 200 °C



β_L : Festigkeit, in Abhängigkeit von Belastungskonstruktion und Belastungsgeschwindigkeit

β_0 : Festigkeit, bestimmt mit Bürsten und Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}_1$

$$\dot{\sigma}_1 = d\sigma_1 / dt = 0,08 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$$

$$\dot{\sigma}_2 = d\sigma_2 / dt = 0,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$$

$$\dot{\sigma}_3 = d\sigma_3 / dt = 33,3 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$$

Bild 12: Probekörperdruckfestigkeit in Abhängigkeit von Belastungskonstruktion und Belastungsgeschwindigkeit

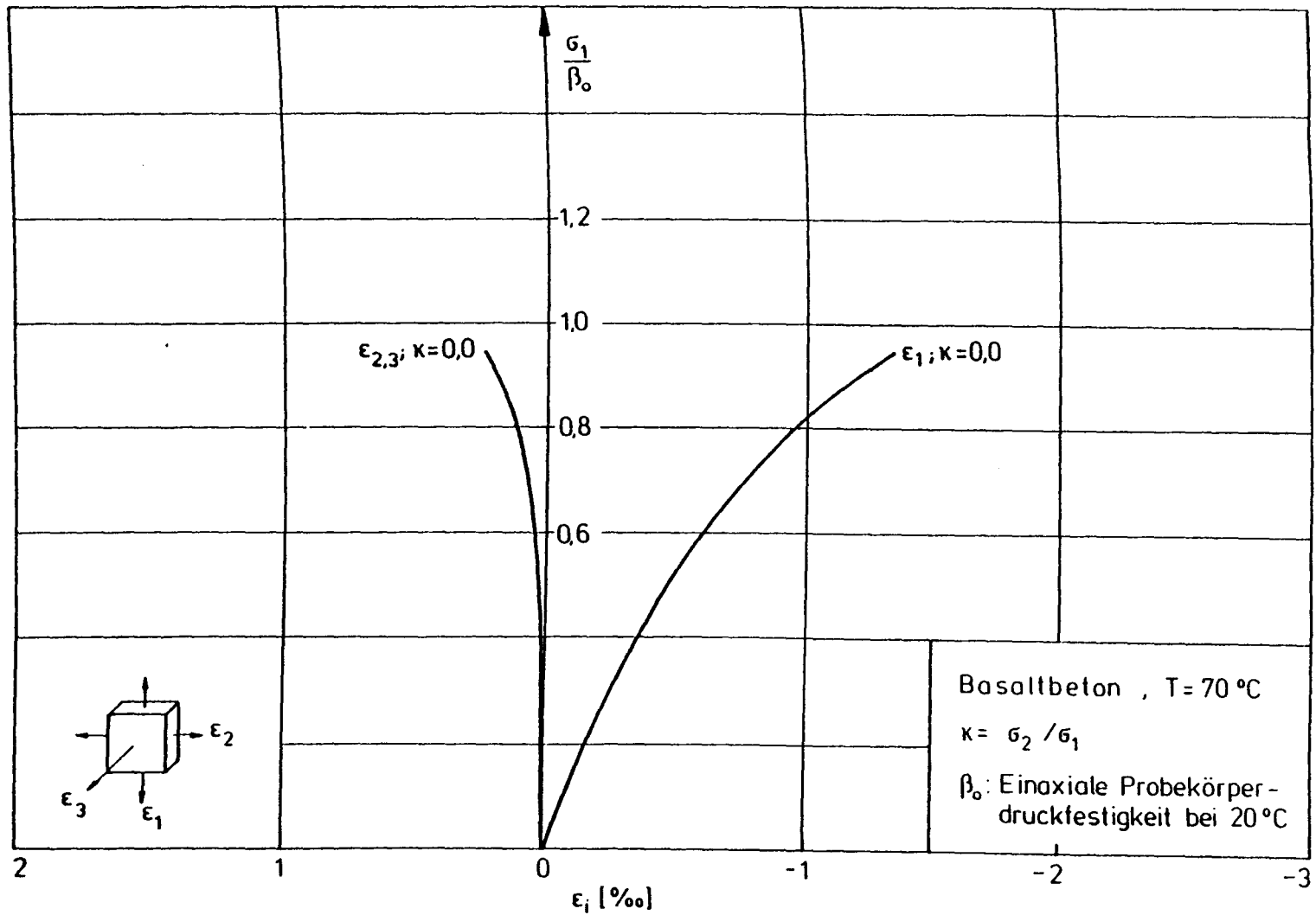


Bild 13: Spannungs-Dehnungs-Linien von Basaltbeton

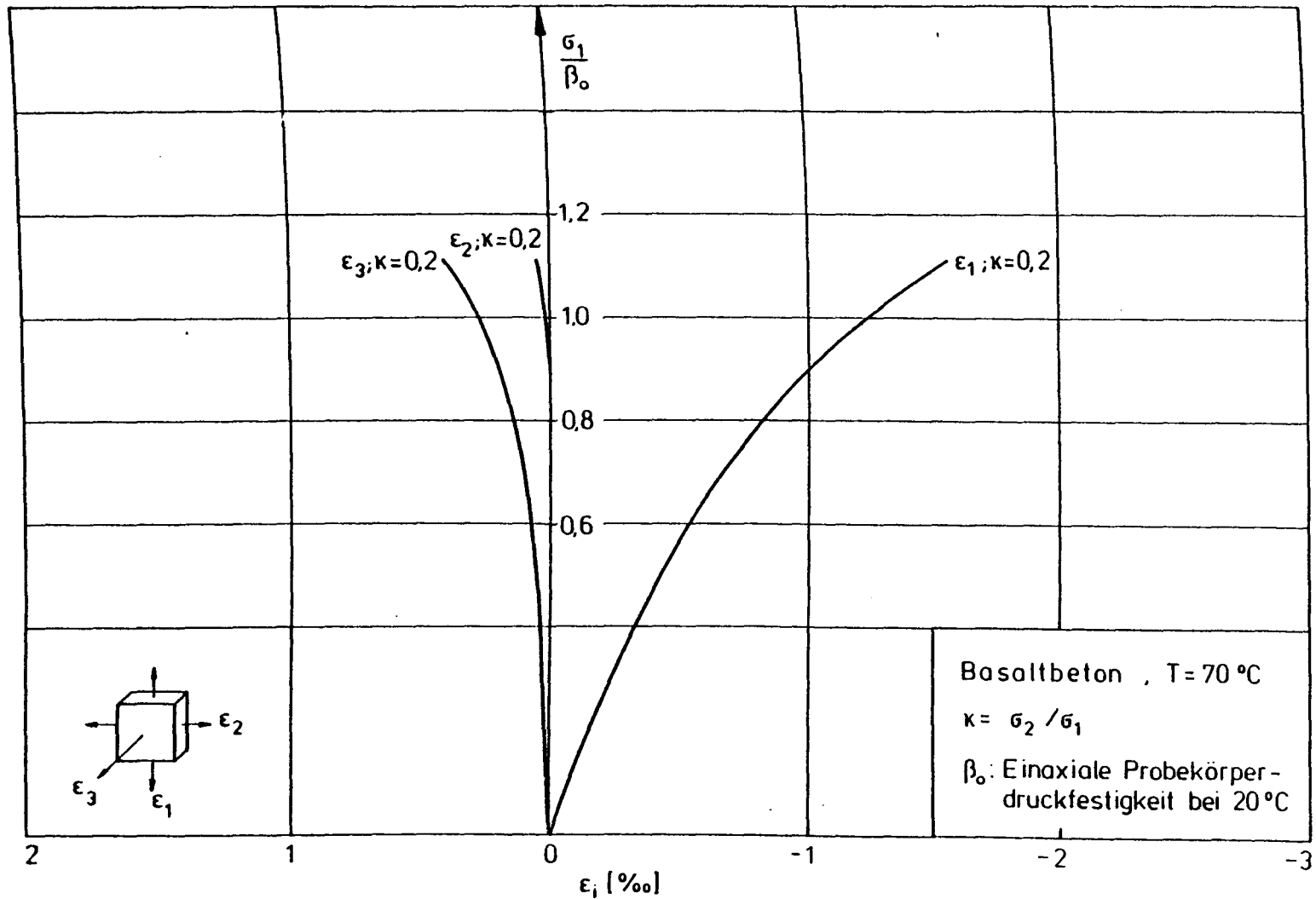


Bild 14: Spannungs-Dehnungslinien von Basaltbeton

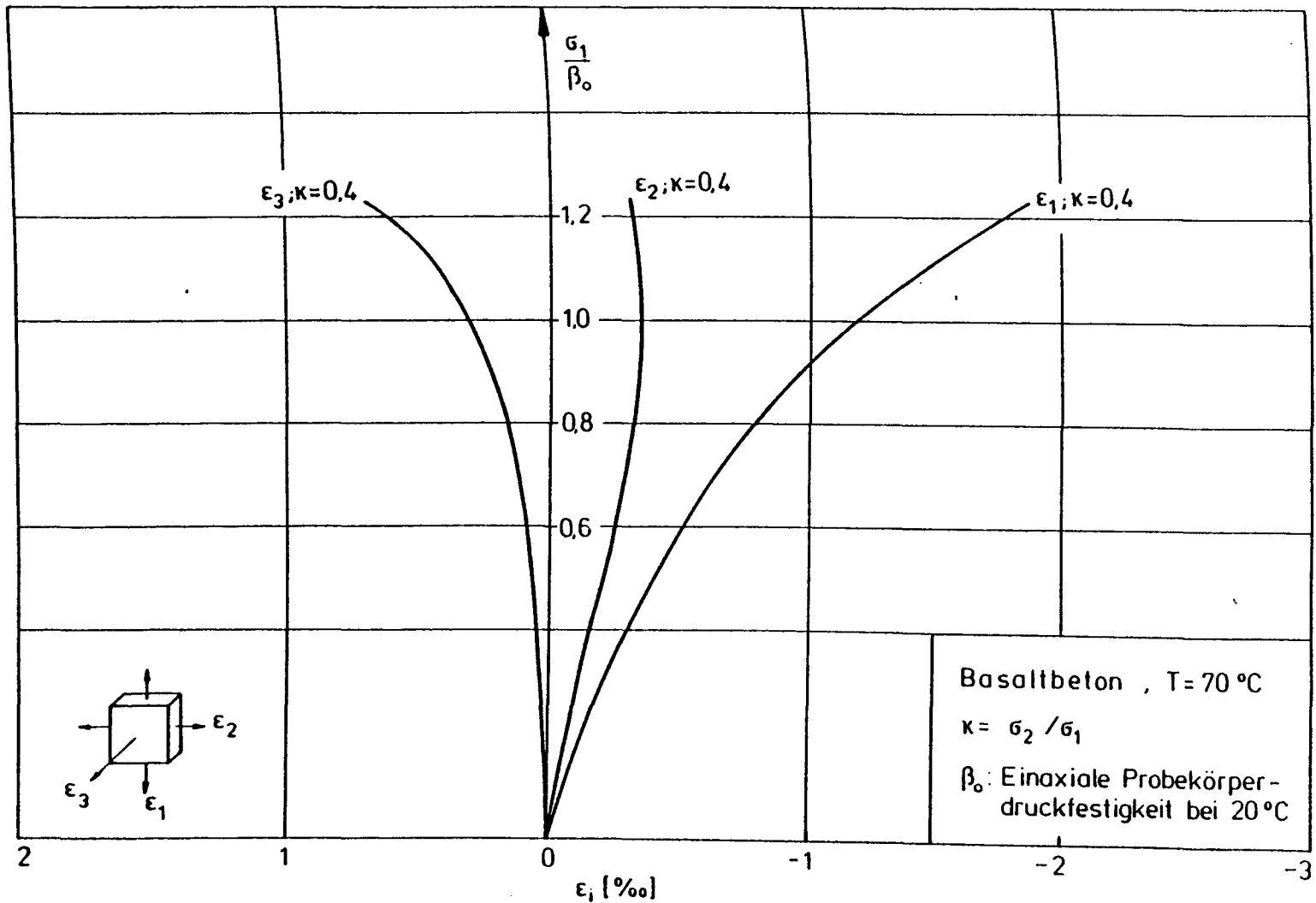


Bild 15: Spannungs-Dehnungslinien von Basaltbeton

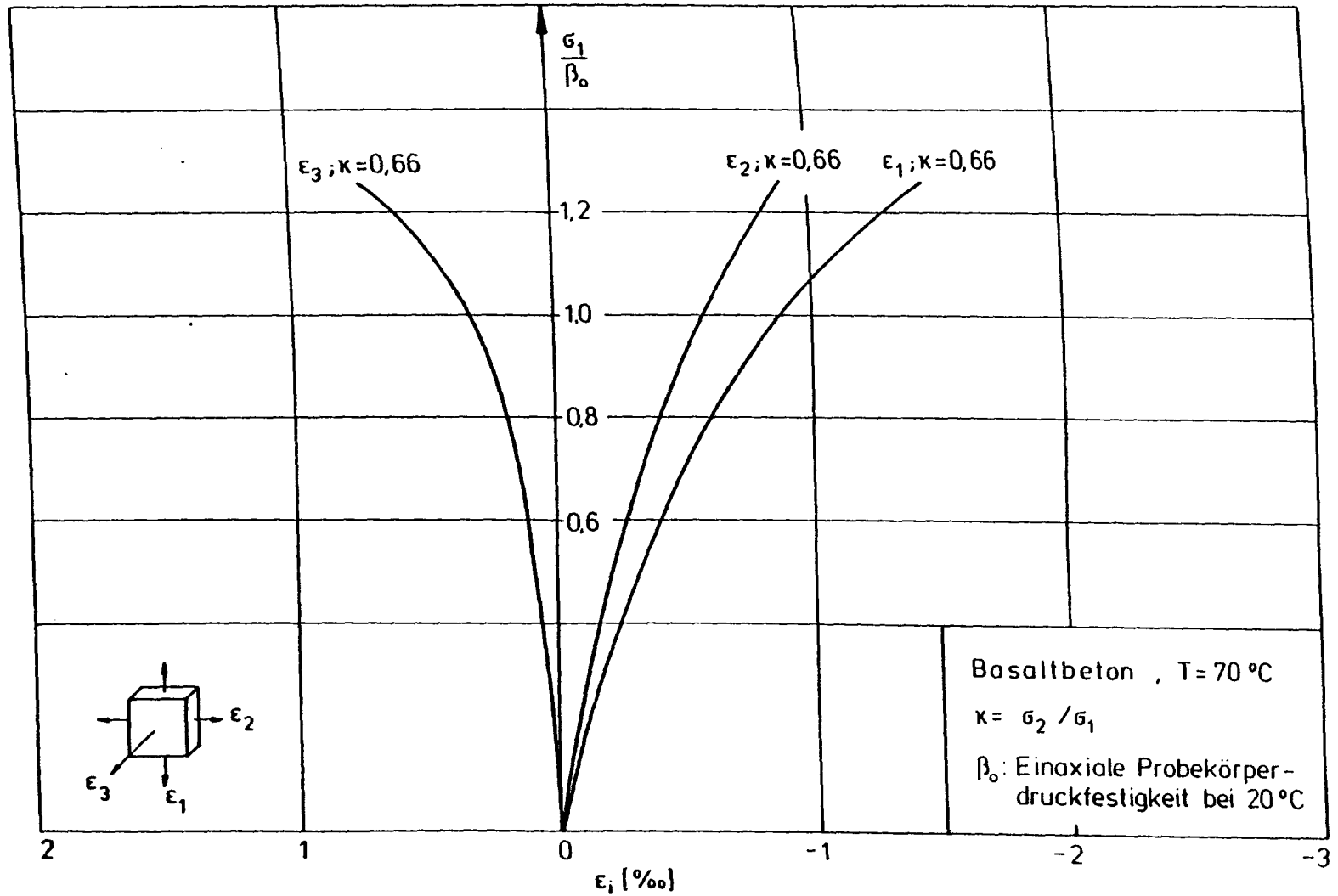


Bild 16: Spannungs-Dehnungslinien von Basaltbeton

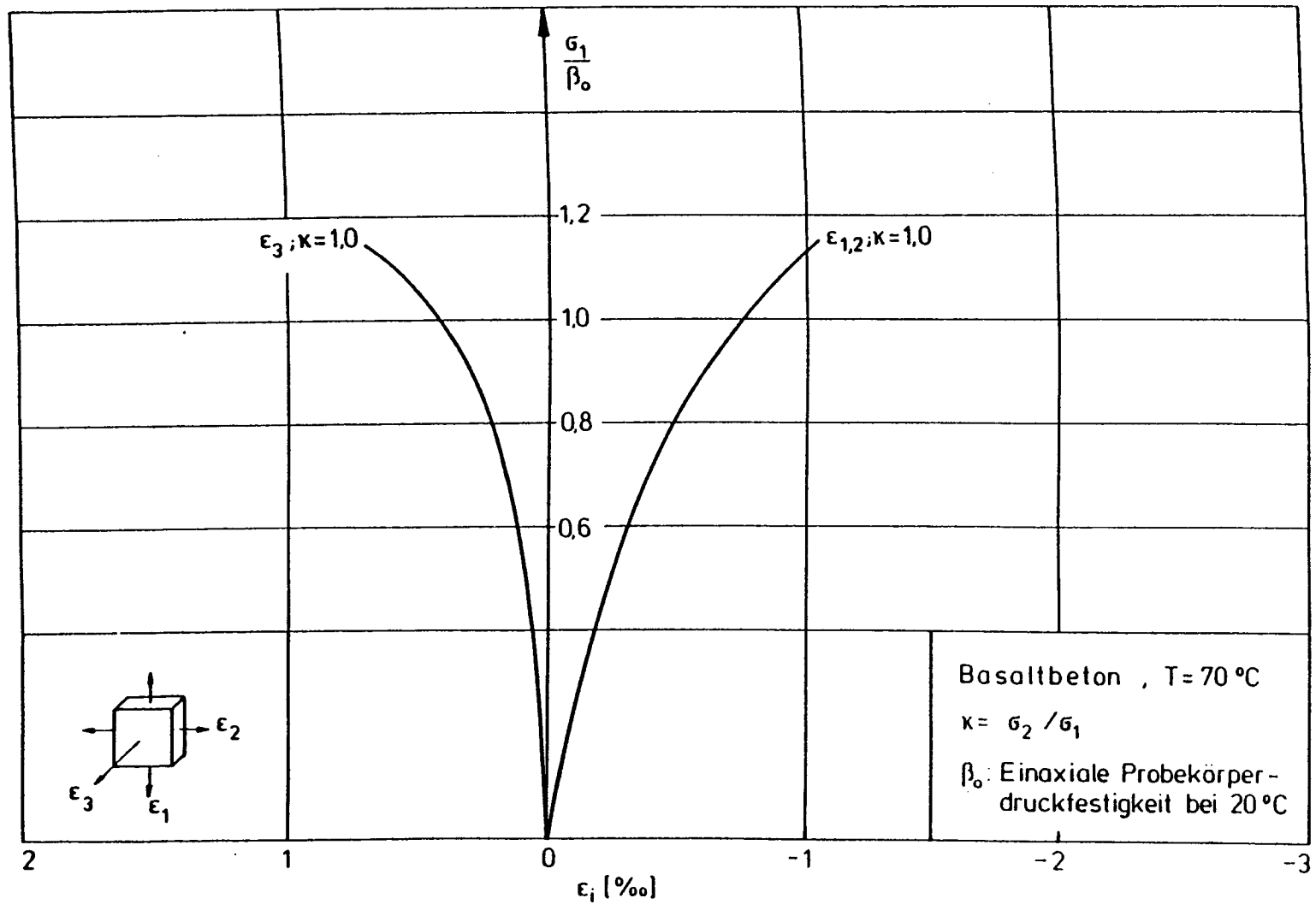


Bild 17: Spannungs-Dehnungslinien von Basaltbeton

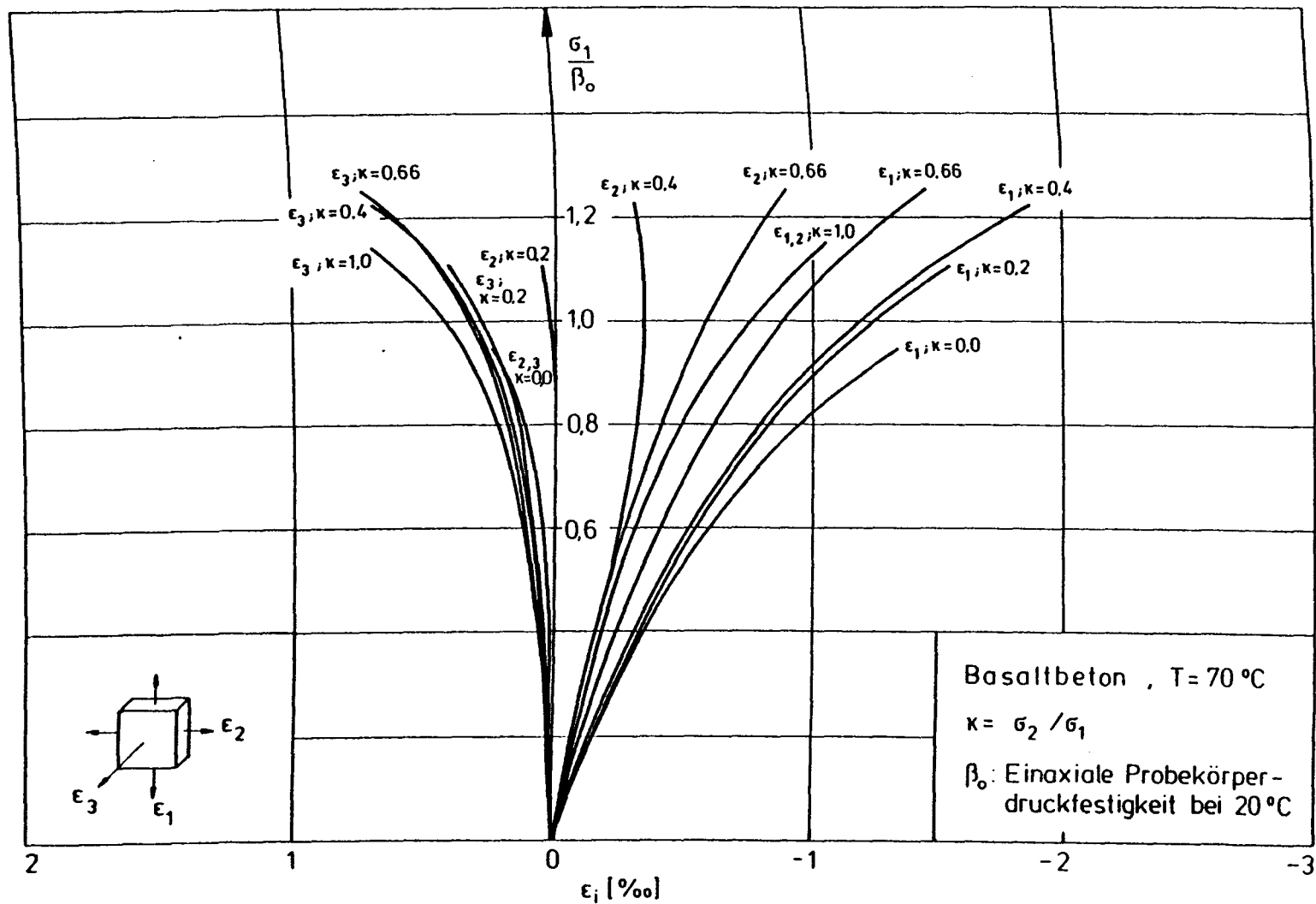


Bild 18: Spannungs-Dehnungslinien von Basaltbeton

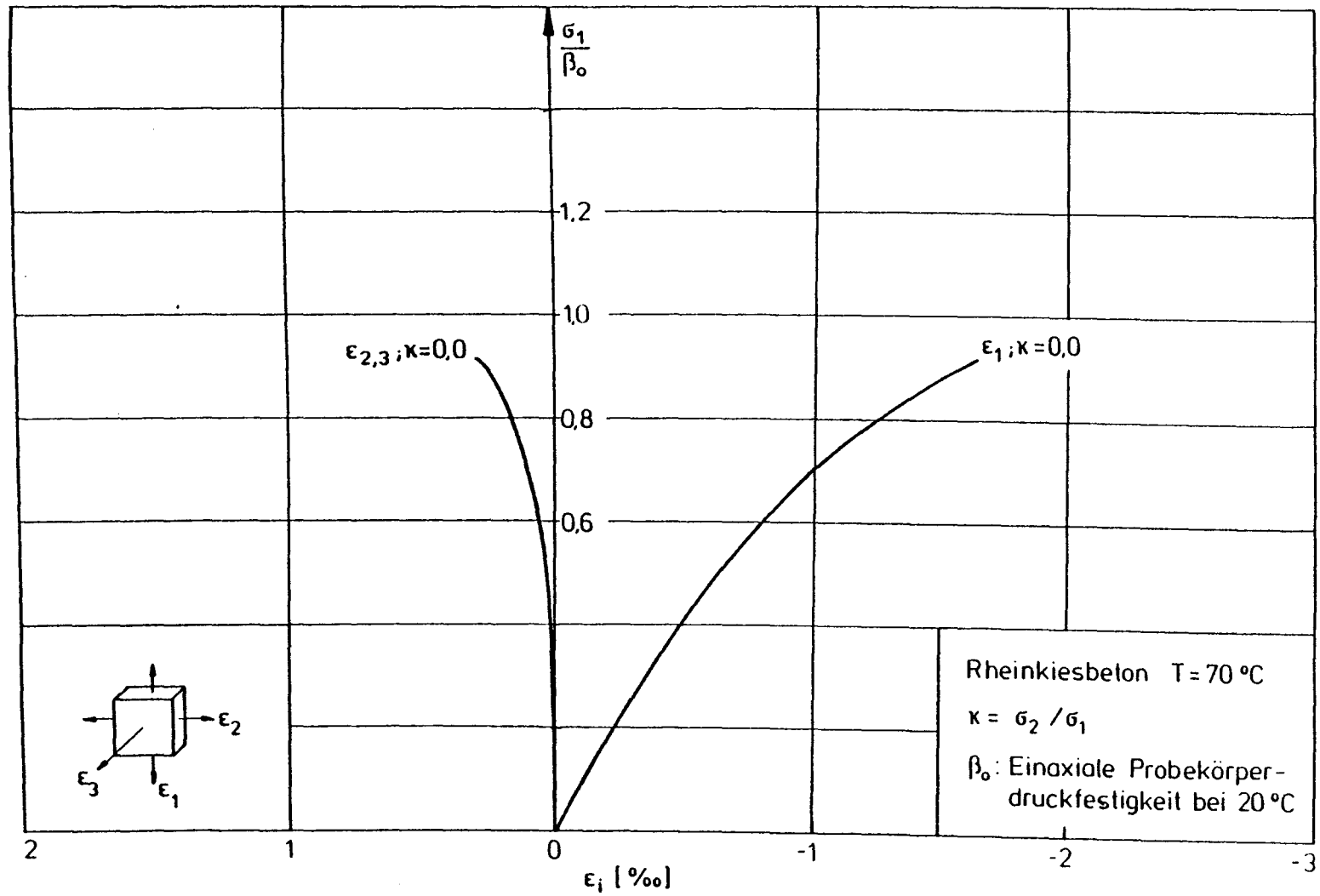


Bild 19: Spannungs-Dehnungslinien von Rheinkiesbeton

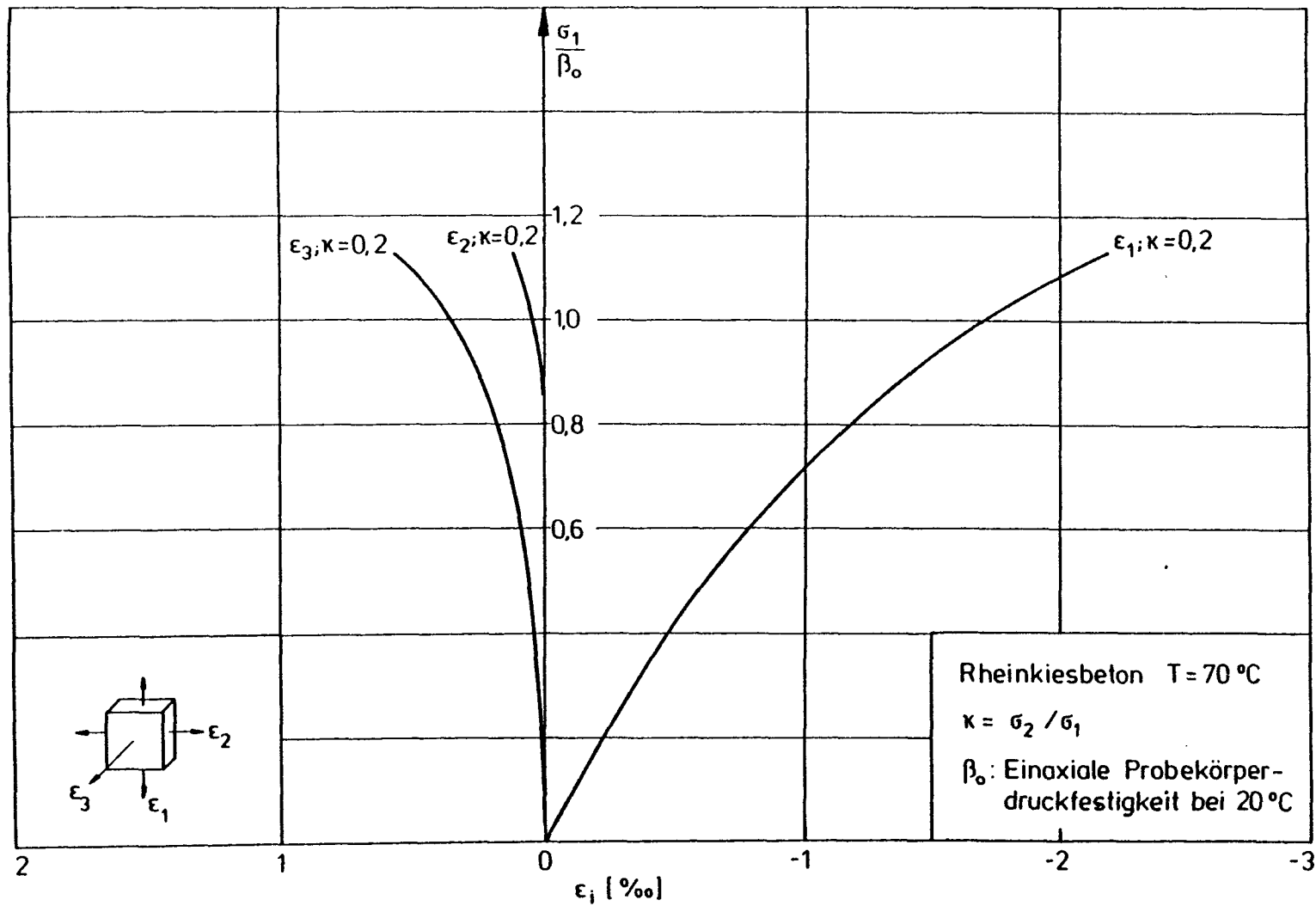


Bild 20: Spannungs-Dehnungslinien von Rheinkiesbeton

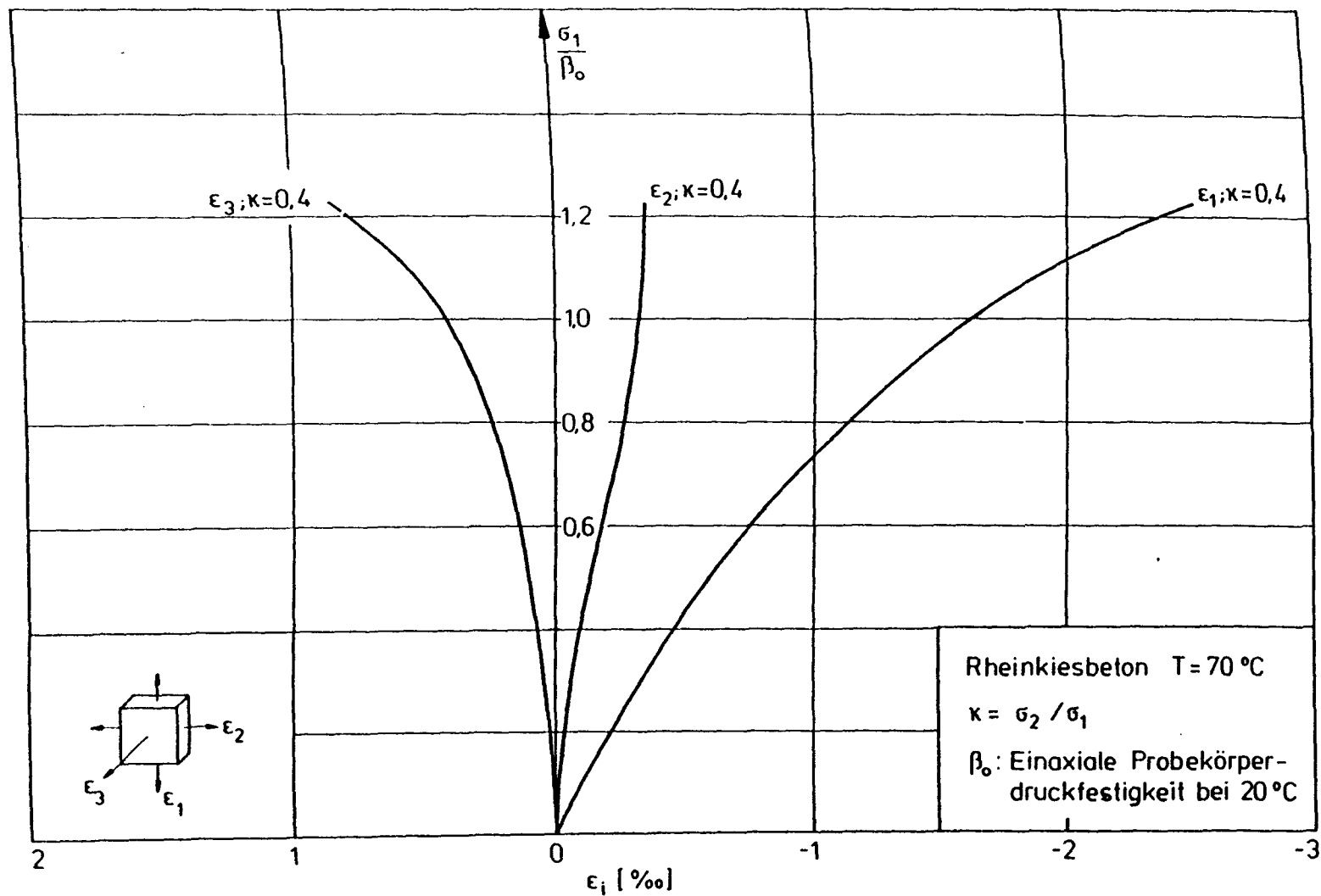


Bild 21: Spannungs-Dehnungslinien von Rheinkiesbeton

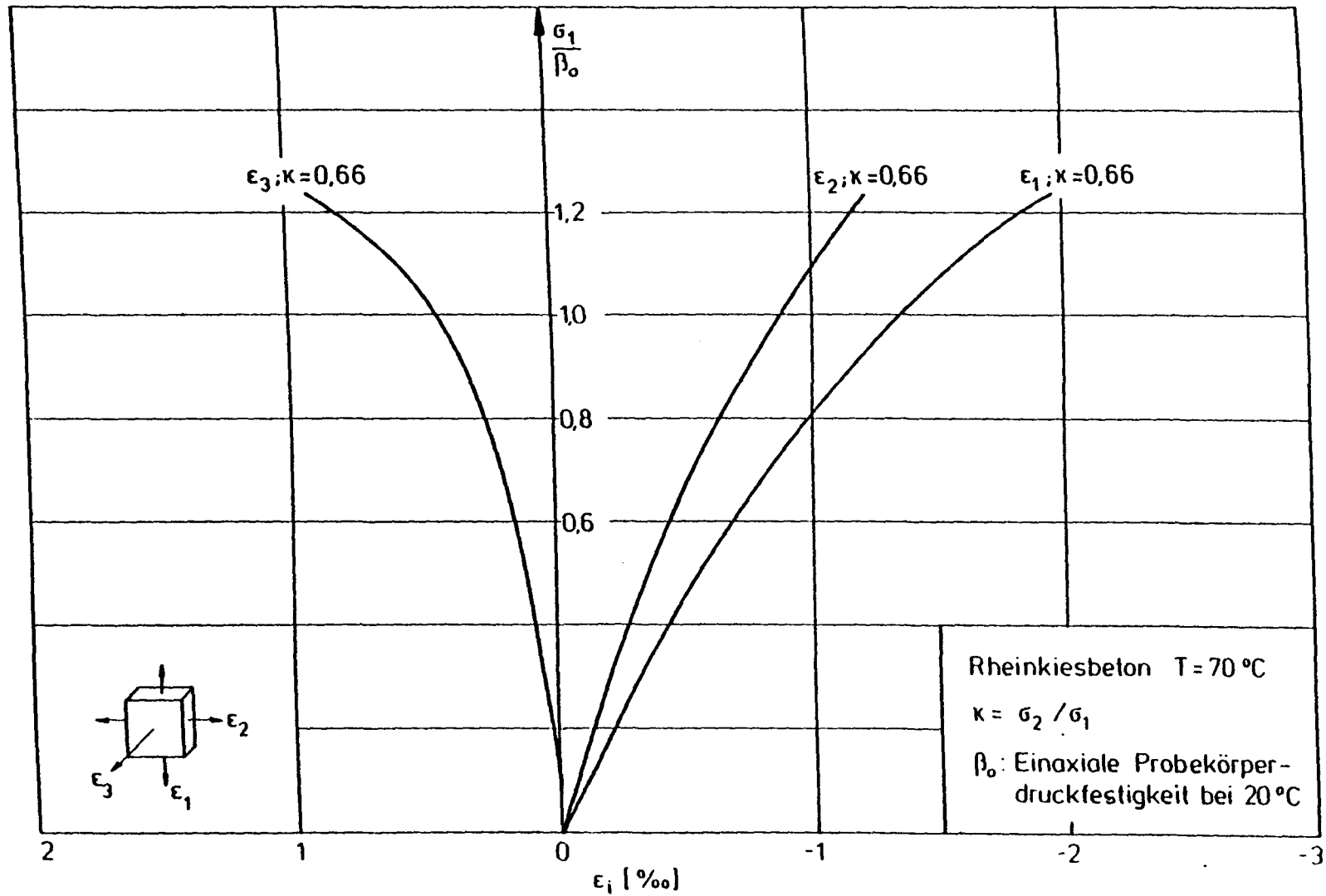


Bild 22: Spannungs-Dehnungslinien von Rheinkiesbeton

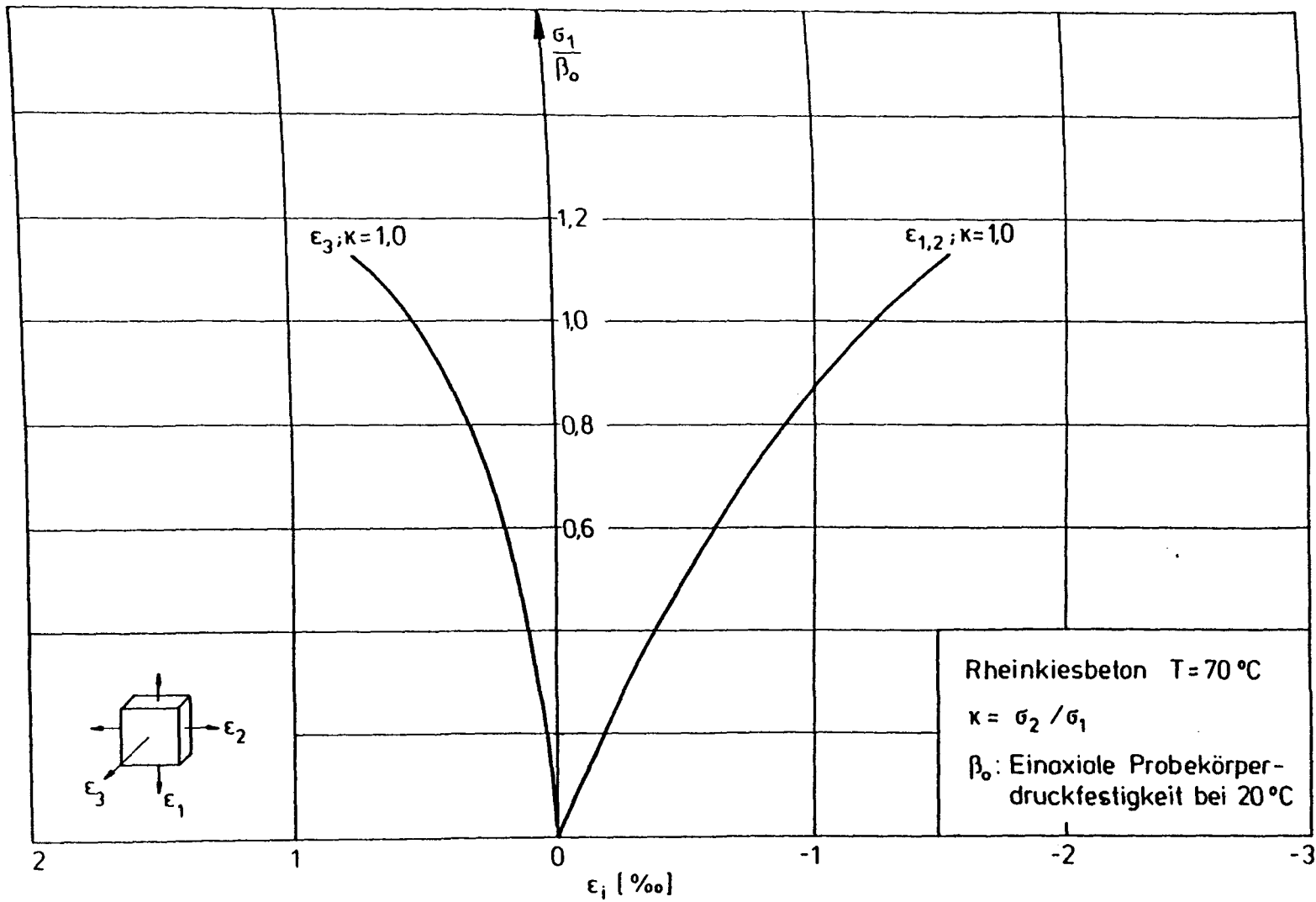


Bild 23: Spannungs-Dehnungslinien von Rheinkiesbeton

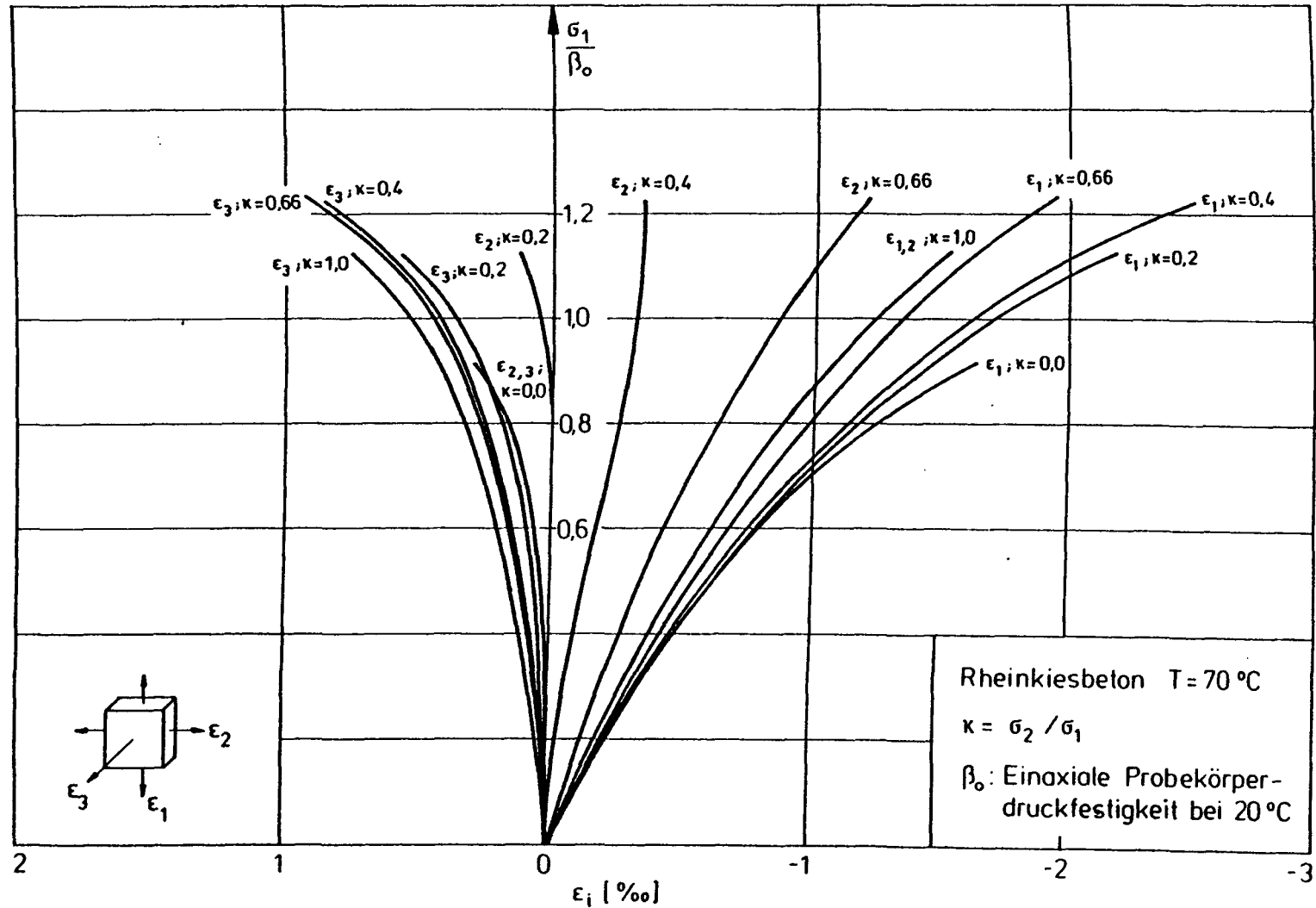


Bild 24: Spannungs-Dehnungslinien von Rheinkiesbeton